INVESTIGACION y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

BIOQUIMICA DE LA PILDORA ABORTIVA

PLUTON, UN PLANETA DESCONOCIDO

CARTOGRAFIA DE LA DORSAL CENTRO-OCEANICA



HELIO 3 SUPERFLUIDO

AGOSTO 1990
500 PTAS.



Agosto de 1990 Número 167

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Ana García: *RU 486*; Manuel Puigcerver: *Plutón*; Jordi Serra Cobos: *Biosonar y cómputo neural en los murciélagos*; René Chávez: *La Dorsal Centro-oceánica*; Joandoménec Ros: *Peces rana*; Ramón Pascual: *Los superfluidos de ^3He*; Javier Ordóñez: *Oliver Heaviside*; J. Vilardell: *Hace 50 y 100 años* y *Taller y laboratorio*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*.

Ciencia y sociedad:

Esther Boix, Josep-Enric Llebot, Joandoménec Ros y Enrique Julve

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

Libros:

Albert Dou, Antonio Prevosti, Luis Ruiz de Gopegui y Luis Alonso

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
13	Departamento de Modelización Molecular de Roussel-Uclaf
14	Edward Bell
15-17	Carol Donner
18	Edward Bell
21	Hank Iken
22	Observatorio Naval norteamericano (*izquierda*), Gabor Kiss (*derecha*)
23-26	Gabor Kiss
27	Gabor Kiss (*arriba y abajo, izquierda*), Mark V. Sykes, Observatorio Steward, Universidad de Arizona (*abajo, derecha*)
31	Russell C. Hansen
32-37	Patricia J. Wynne
52-53	Stephen P. Miller, Daniel S. Scheirer, Charles M. Weiland, Suzanne M. Carbotte y Laura J. Perram, Universidad de California en Santa Bárbara, y Stacey A. Tighe, Universidad de Rhode Island
54	Ian Worpole
55	Nancy R. Grindlay y Suzanne M. Carbotte
56	Ian Worpole
57	Laura J. Perram
58	Ian Worpole (*arriba*), Laura J. Perram, Daniel S. Scheirer y Marie-Helene Cormier, Universidad de Santa Bárbara (*abajo*)
59	Ian Worpole
62-63	© Scott Johnson, A. Animals
64	Fundación Allan Hancock, Biblioteca de Biología y Oceanografía, U. California del Sur (*arriba, izquierda y centro; abajo, centro y derecha*), Museo de Victoria, Melbourne (*arriba, derecha*), Museo Británico de H.ª Natural (*abajo izquierda*)
65	Museo Británico de Historia Natural (*arriba y centro*), Patricia J. Wynne (*abajo*)
66	David B. Grobecker
67	Theodore W. Pietsch
68-69	Patricia J. Wynne
71-76	Joe Lertola
79-85	Julio A. Alonso, M. Pilar Iñiguez y Pere A. Rovira Castellá
87	Fotografía de Heinrich Hertz, Biblioteca Burndy
88	Andrew Christie (*arriba*), Steven Homer/First Light (*abajo*)
89-90	Andrew Christie
91	Biblioteca Niels Bohr AIP
92-93	Paul J. Nahin
94-97	Michael Goodman
100-107	PLS, Cl. Marchand



LA PORTADA recoge un corte en sección de una vasija giratoria de helio superfluido. Las leyes de la mecánica cuántica prohíben que el líquido gire como un todo; en cambio, un conjunto de remolinos en miniatura perforan su superficie. El isótopo ^3He, que se torna superfluido a temperaturas del milikelvin, forma cuatro tipos distintos de vórtices (véase "Los superfluidos del ^3He", por Olli V. Lounasmaa y George Pickett, en este mismo número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal Garfella
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48   Telefax 419 47 82

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Armand Schwab, Jr., *Managing Editor*; Timothy Appenzeller, Laurie Burnham, *Associate Editors*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; John Horgan; June Kinoshita; Philip Morrison, *Book Editor*; John Rennie; Philip E. Ros; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen, Paul Wallich; Karen Wright
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.
ADVERTISING DIRECTOR Robert F. Gregory
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Georg-Dieter von Holtzbrinck
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª
08029 Barcelona (España)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	5500	10.000
Extranjero	6200	11.500

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 500 pesetas
Extraordinario: 650 pesetas

- Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
- En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
- El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. 652 42 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

ISSN 0210-136X   Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por T2, Llull, 145 - 08018 Barcelona
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de la Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Hace...

...cincuenta años

"El próximo ciclotrón de Ernest Lawrence se reservará para investigación fundamental, dedicándolo al descubrimiento de los misterios de la energía y las transmutaciones atómicas, para lo cual generará energías de 100.000.000 electronvolt, si no mayores. Un ingenio de desintegración atómica de tal potencia es peligroso a la vez que útil. Hasta el propio ciclotrón actual (cuyo tamaño es un veinteavo del proyectado) es mirado con respeto por los científicos. Si colocáramos una mano en el haz de deuterones que ese artefacto lanza, a veces, en forma de un llamativo chorro de luz azul lavanda, nos la quemaría cual si hubiéramos estado jugando con un soplete."

"En la Feria Universal de Nueva York se ofrece un magnífico espectáculo de iluminación. Tomemos por ejemplo uno de los productos: la lámpara fluorescente. Es ésta un eficiente y práctico manantial de luz diurna. En su interior, un arco eléctrico genera energía ultravioleta, que es invisible, pero que se convierte en luz visible merced al polvo fluorescente que recubre los tubos. Esta nueva lámpara produce del orden de 40 lúmenes por watt, mientras que las caseras de filamento sólo llegan a los 15 lúmenes."

"Damos la razón al Presidente de los EE.UU. cuando solicita 50.000 aviones para nuestra defensa nacional y aconseja además construir en un año 20.000 aparatos destinados al ejército y la armada. Ello será posible si se cumplen las condiciones siguientes. Se simplifican y aceleran radicalmente los procedimientos de selección de prototipos y de realización de pedidos; se aceleran los métodos de inspección y aceptación; las escuelas de formación profesional dedican un gran esfuerzo a preparar un ingente número de mecánicos; los sindicatos retiran sus limitaciones para admisión de personal nuevo; las universidades preparan ingenieros en el número necesario; las comisiones aliadas comunican a nuestros servicios aéreos toda la información que han adquirido durante la guerra; los jefes del Arma Aérea y de la Agencia de Aeronáutica recurren a métodos dictatoriales para no titubear al elegir determinados tipos, y para construirlos también sin titubeos; los ingenieros se adhieren a la idea alemana de construir aviones para 100 horas de vida y no para 5000, ya que en tiempo de guerra la vida de un avión es muchísimo más corta que en tiempo de paz; es decir, hay que conseguir prestaciones, maniobrabilidad y potencia de fuego sacrificando la durabilidad."

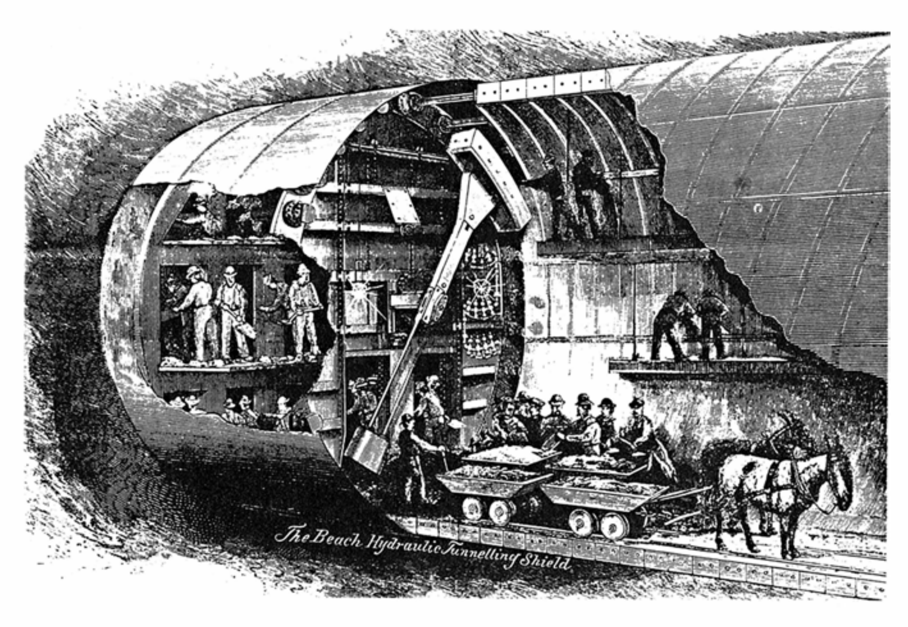
...cien años

"Afirma Mr. Thomas A. Edison que podrían evitarse las epidemias de fiebre amarilla si, al descubrirse los primeros casos, se empaparan de bactericida el suelo del entorno de la casa y las calles de la misma manzana. De ser correcta la teoría, que parece abonada por muchas razones, de que la fiebre amarilla se propaga por la superficie de la tierra, valdría realmente la pena comprobar el plan que propone Mr. Edison."

"En una conferencia pronunciada recientemente ante un club científico, el profesor Elihu Thomson ha declarado que, con la electricidad, cabe esperar que se obtengan velocidades mucho mayores que las que actualmente se consiguen con la locomotora de vapor. Es su creencia que, si pudiéramos retornar de aquí a cien años, nos encontraríamos con que se viajaría a velocidades de 250 kilómetros por hora."

"En la perforación del túnel que unirá Port Huron (Michigan), en tierra estadounidense, con Sarnia, en tierra canadiense, se están empleando escudos hidráulicos Beach, invento de Mr. Alfred E. Beach, de SCIENTIFIC AMERICAN. El objeto del escudo es proteger a los operarios mientras excavan la tierra y construyen el túnel. Consiste en un cilindro de gran resistencia mecánica, que en cierto modo se asemeja a un enorme barril al que se hubiera despojado de la tapa y el fondo. Mediante un sistema de gatos hidráulicos, capaces de actuar por separado o en combinación, es posible gobernar la dirección de ese escudo de perforación con la mayor exactitud."

"Un rufián de nombre Kemmler, cuyo delito fue el atroz asesinato de una mujer, ha sido el primer ser humano destinado a morir por electrocución. El condenado fue atado con correas a una silla muy recia, se le colocaron electrodos en contacto con la parte superior de la cabeza y la base de la espina dorsal, y a ellos se conectó un potente generador eléctrico de corriente alterna de la casa Westinghouse. A continuación, al accionarse un interruptor, el criminal resultó muerto instantáneamente por efecto de la descarga. La ejecución de criminales, sea por decapitación, garrote, horca, fusilamiento o corriente eléctrica, es un tema espeluznante; por ello, no resulta extraño que la prensa sensacionalista, con el respaldo de los adversarios de la pena de muerte por electrocución, haya aprovechado al máximo la ocasión para llenar sus columnas con todo lujo de detalles repugnantes."



RU 486

En Francia, este fármaco polémico se utiliza para interrumpir el embarazo. No fue ese, sin embargo, el fin que guió la síntesis del compuesto, que ofrece, además, múltiples aplicaciones

André Ulmann, Georges Teutsch y Daniel Philibert

En 1980, uno de nuestros colaboradores sintetizó una molécula con una propiedad inesperada. Similar, en su estructura química, a la hormona progesterona, se unía con idéntica firmeza a los receptores de progesterona en las células. Mas, en vez de desencadenar los efectos habituales de la hormona, la nueva sustancia los bloqueaba. Y, dado que la progesterona resultaba fundamental para mantener el embarazo, el descubrimiento de esta propiedad insólita abría la posibilidad de que el producto descubierto sirviera para su interrupción.

La sustancia, designada con el nombre de RU 486 (siglas de la compañía fabricante, la Roussel-Uclaf), se expende en Francia y es objeto de polémica en todo el mundo. La atención internacional —partidaria en el caso de los abortistas o contraria, en el de los antiabortistas— se ha centrado sobre el papel de la droga en la interrupción voluntaria del embarazo en las fases iniciales del mismo.

Bajo el nombre de mifepristone, la RU 486 se administra en forma de tableta junto a una pequeña dosis de prostaglandina, que aumenta la frecuencia y la intensidad de las contracciones uterinas necesarias para expulsar al embrión. La combinación de drogas se autoriza en Francia para interrumpir embarazos de hasta 49 días (contando desde el primero del último periodo menstrual). En ese país, entre la tercera y la cuarta parte de las mujeres que deciden abortar en estadios iniciales de la gestación eligen actualmente este método químico en vez de las prácticas quirúrgicas habituales.

En los próximos años, la RU 486 podría expenderse en otras partes del mundo con el mismo fin. La empresa está preparando su distribución en Gran Bretaña, los Países Bajos y Suecia, en los que ya se han realizado los trámites necesarios para obtener la licencia. Pero esa substancia podría servir también para otros propósitos: ofrece posibles aplicaciones terapeúticas más allá del control de la natalidad; entre ellas, el tratamiento de algunos cánceres.

La RU 486 no se ideó con el objetivo de encontrar un nuevo método abortivo. Sin embargo, cuando se consiguió su síntesis, ciertos intereses sociales y acontecimientos científicos habían contribuido a crear el clima favorable para ese destino. Algunas organizaciones internacionales reclamaban la introducción de nuevas técnicas de control de la natalidad. Se esperaba disponer de métodos más sencillos o eficaces para detener el crecimiento demográfico, sobre todo el experimentado en los países en vías de desarrollo. La expansión de la población mundial, se aduce, pone en peligro la disponibilidad futura de alimentos, agua y otros recursos y, por tanto, amenaza el bienestar y la supervivencia de la especie humana.

Entre esas tecnologías así deseadas se encuentran los nuevos métodos para la interrupción del embarazo. Muchas mujeres de los países en desarrollo y, en menor cuantía, en los países industrializados, recurren al aborto como único método de planificación. Aunque la vía quirúrgica legal es segura y eficaz, presenta limitaciones bien conocidas. Durante los tres primeros meses de embarazo, las aspiraciones (en ocasiones precedidas por dilatación del cérvix) son el método de elección habitual. Esta técnica consiste en aplicar una succión para extraer el embrión y el tejido endometrial en el que se encuentra inmerso. Después de unos tres meses de embarazo, los procedimientos necesarios suelen ser más complejos. Conforme progresa la gestación, aumenta el riesgo de infección, hemorragia, lesiones y alteración de la fertilidad. En las naciones en vías de desarrollo, donde los recursos quirúrgicos resultan a menudo inadecuados, el peligro es aún mayor. Y lo grave: cuando no puede accederse fácilmente a clínicas legales, muchas mujeres mueren como consecuencia de abortos realizados en condiciones peligrosas, generalmente por hemorragias no controladas o infecciones.

Los estudios con hormonas esteroideas (la progesterona es una de ellas) abrían la posibilidad de descubrir métodos no invasivos y en teoría más seguros para interrumpir el embarazo. Los resultados sugerían que si se encontraba un agente con la acción antiprogesterona propia de la RU 486 y se podía administrar en forma de tableta o mediante inyección, se dispondría de una alternativa química a la cirugía.

Estas reflexiones tomaron cuerpo con el trabajo realizado a finales de los años sesenta y en los setenta por Elwood V. Jensen, de la Universidad de Chicago, Etienne-Emile Baulieu, del INSERM (el instituto francés de investigación médica), y Bert W. O'Malley, de la Facultad de Medicina Baylor en Houston, Texas. Estos investigadores descubrieron los mecanismos básicos mediante los cuales las

ANDRE ULMANN, GEORGES TEUTSCH y DANIEL PHILIBERT trabajan en la compañía Roussel-Uclaf, en Romainville. Ulmann, nefrólogo y endocrinólogo, es jefe médico. Dirigió la evaluación clínica de la RU 486 preparada por la empresa. Teutsch, químico de formación, está al frente de la sección de endocrinología, en la que investiga la síntesis de esteroides y péptidos y diseño de nuevos antibióticos. Philibert, físico y farmacólogo, supervisó la investigación de los efectos de la RU 486 en células y animales.

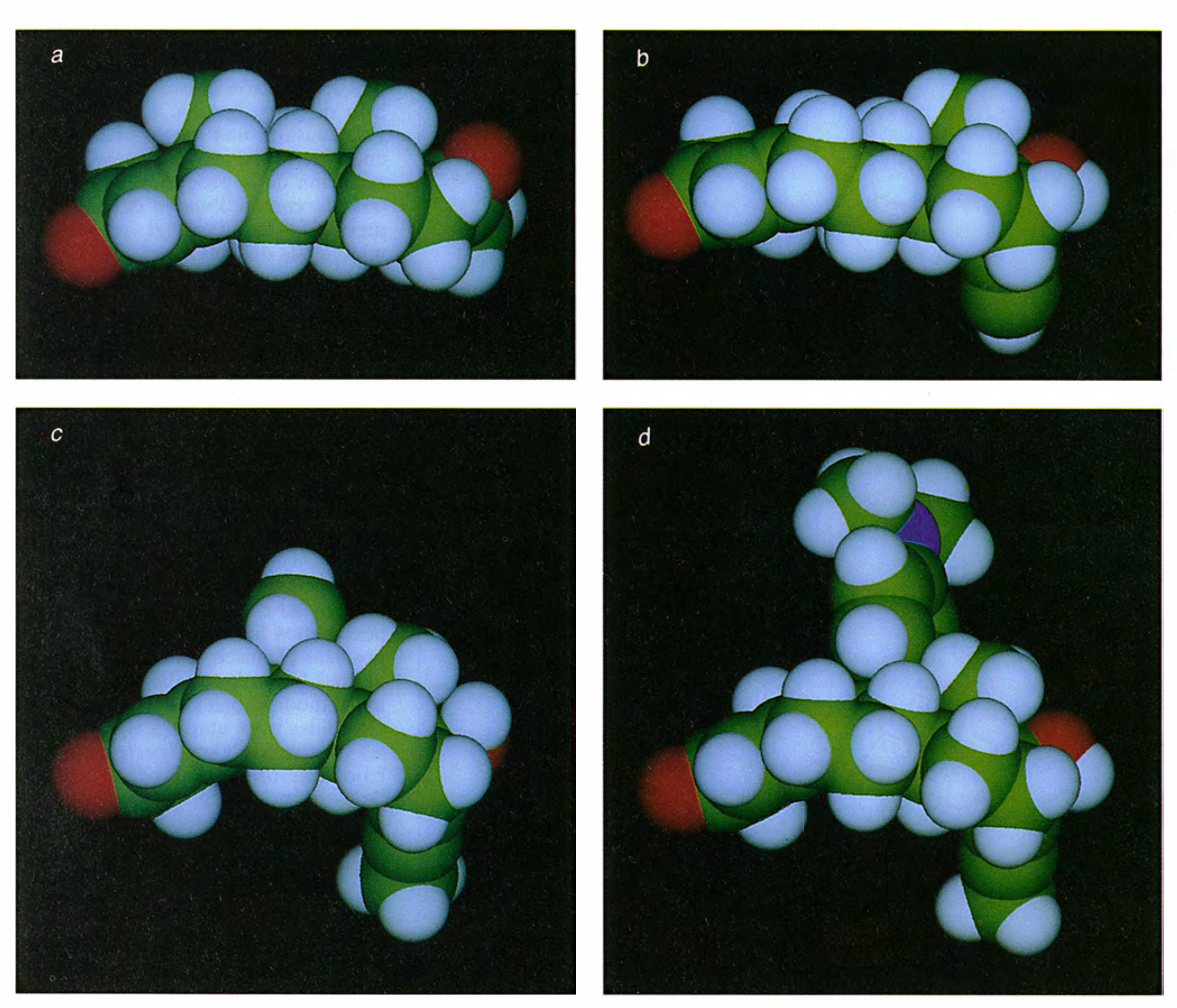
hormonas esteroideas inducen a las células a sintetizar proteínas. Entre los esteroides, que son derivados del colesterol, se incluyen no sólo los progestágenos (progesterona y moléculas similares), sino también los estrógenos (como el estradiol), los andrógenos (así la testosterona), los glucocorticoides (la cortisona) y los mineralocorticoides (la aldosterona).

Los mencionados investigadores demostraron que los esteroides, a diferencia de las hormonas polipeptídicas, penetran en el interior de las células efectoras. Dentro de la célula, se unen a receptores nucleares. La unidad resultante, consistente en el esteroide (ligando) unido a su receptor activado, se enlaza con la cromatina del núcleo (el complejo de ADN y sus proteínas asociadas). Este proceso desencadena la transcripción, de un gen escogido, de ADN en ARN mensajero. Dado que la síntesis de proteínas, que la progesterona estimula en el útero, es esencial para el mantenimiento del embarazo, se suponía que, cuando se descubriera una sustancia capaz de ocupar los receptores de progesterona sin inducir los efectos de esta hormona, se dispondría de un método eficaz y selectivo para abortar.

Se preveía que un antagonista de la progesterona, según en qué momento se administrara, podría evitar la implantación de un óvulo fecundado o producir el desprendimiento de la pared uterina de un embrión más desarrollado. Los detalles acerca de cómo se inducirían estos efectos se deducían del conocimiento adquirido sobre el ciclo menstrual y el embarazo en los mamíferos.

Durante la primera mitad del ciclo menstrual —la fase folicular— el estrógeno y otras hormonas dirigen el desarrollo de un folículo ovárico (un óvulo y las células que lo rodean) e inducen la proliferación de las células del endometrio. Después de la liberación del óvulo en el momento de la ovulación, a mitad del ciclo, el resto del folículo que permanece en el ovario constituye el cuerpo lúteo, una glándula transitoria que segrega un flujo continuo de progesterona.

La progesterona convierte el endometrio en proliferación en un tejido capaz de acoger y nutrir un embrión en desarrollo. En concreto, la hormona actúa sobre las células del



1. ESTRUCTURA de la molécula de progesterona (*a*) y de tres moléculas sintéticas afines, recreadas mediante ordenador. Dos de estas moléculas, la noretindrona (*b*) y la RU 42764 (*c*), remedan las funciones de la hormona, que resultan cruciales para el mantenimiento del embarazo. La RU 486 (*d*) contrarresta los efectos de la progesterona, antagonismo que parece obedecer a la proyección que emerge por encima del plano de la molécula del compuesto. Las esferas verdes, azules, rojas y púrpuras representan, respectivamente, los átomos de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno.

endometrio induciéndolas a sintetizar y almacenar glucógeno, promueve el crecimiento de los vasos sanguíneos del endometrio en expansión y aviva la actividad secretora de este tejido. La progesterona facilita la relajación del músculo uterino e impide así las contracciones que podrían expulsar al embrión; se opone también a la expulsión aumentando la firmeza del cérvix e inhibiendo su dilatación. Estos últimos efectos obedecen, en parte, a la acción inhibidora de la progesterona sobre la secreción uterina de prostaglandinas.

Si el óvulo es fecundado, comenzará a implantarse unos seis días después de la fertilización. Muy pronto, el trofoblasto, o placenta en desarrollo, estimulará al cuerpo lúteo para que mantenga la producción de progesterona hasta que la propia placenta alcance su plena capacidad funcional, alrededor de la octava semana de embarazo. Si no hay fecundación, el cuerpo lúteo empieza a degradarse pasados unos doce días; hacia el día 28 del ciclo, la disminución de los niveles de progesterona provoca el desprendimiento de todas las capas del endometrio, salvo la capa basal (o permanente). A continuación, se produce un sangrado uterino y el ciclo comienza de nuevo.

Por tanto, podía preverse que la administración de antagonistas de la progesterona antes de la implantación evitara que el endometrio sufriera los cambios necesarios para acoger a un nuevo embrión. Administrada después de la implantación, tal sustancia iniciaría una cadena de acontecimientos que culminarían con la expulsión del nuevo ser. El bloqueo de la actividad secretora de los tejidos de revestimiento uterino iniciaría la erosión del endometrio. Debido a ello, la placenta y el embrión humano se desprenderían de la pared del útero. A continuación, el cuerpo lúteo empezaría a deteriorarse, teniendo lugar una disminución brusca de la producción de progesterona. Lo cual, a su vez, causaría una mayor erosión del endometrio. Al mismo tiempo, la disminución de la progesterona aumentaría la contractibilidad del músculo uterino y facilitaría el reblandecimiento y la dilatación del cérvix, conduciendo finalmente a la expulsión del embrión.

A pesar de estas previsiones —y de años de investigación, llevada a cabo principalmente por el Instituto Nacional de la Salud de Estados Unidos— no se había descubierto ningún candidato aceptable a antagonista de la progesterona hasta que se sintetizó la RU 486 en 1980. Nadie de la Roussel-Uclaf trabajaba, en ese momento, en la búsqueda de un antagonista de la progesterona.

La pequeña historia del descubrimiento del compuesto empieza unos pocos años antes, en 1975. Uno de nosotros (Teutsch) estaba estudiando de qué forma leves alteraciones químicas modificaban la capacidad de los esteroides para unirse a sus receptores y activarlos. Como parte de su trabajo, desarrolló un método de síntesis de versiones de esteroides que no existían en la naturaleza. Un joven becario posdoctoral, Alain Belanger, era el encargado de obtener las nuevas moléculas.

De manera rutinaria, los farmacólogos de la compañía caracterizaban cada nuevo análogo de esteroide sintetizado en la Roussel-Uclaf como primer paso para determinar sus posibles efectos sobre el organismo. Partiendo del principio de que

2. ESTEROIDES, derivados del colesterol (*a*), en los que se numeran los carbonos según un esquema establecido. Existe una similitud estructural entre los representantes de cada clase: progestinas (*b*), glucocorticoides (*c*), mineralocorticoides (*d*), andrógenos (*e*) y estrógenos (*f*). Por su semejanza, los esteroides sintéticos pueden unirse a veces a más de un tipo de receptor esteroideo. Por ejemplo, la RU 486 (*g*), que es un derivado de la progesterona, se une fuertemente a los receptores de las progestinas y de los glucocorticoides. El nombre químico de la RU 486 es 11-sustituido 19-no-esteroide porque un grupo atómico no presente en la progesterona se enlaza con el carbono en la posición 11 y porque se ha eliminado el grupo metilo (CH_3), que normalmente lleva el carbono 19.

toda molécula capaz de unirse a un receptor lo activa o lo bloquea, los farmacólogos establecían la afinidad entre la nueva molécula sintetizada y un grupo de receptores representativos de cada una de las cinco familias de esteroides. Los farmacólogos, dirigidos por Roger Deraedt, descubrieron que algunas de las moléculas sintetizadas con el método de Teutsch se enlazaban estrechamente con el receptor de progesterona, otras se unían fuertemente al receptor de glucocorticoides y otras lo hacían con ambos tipos de receptores.

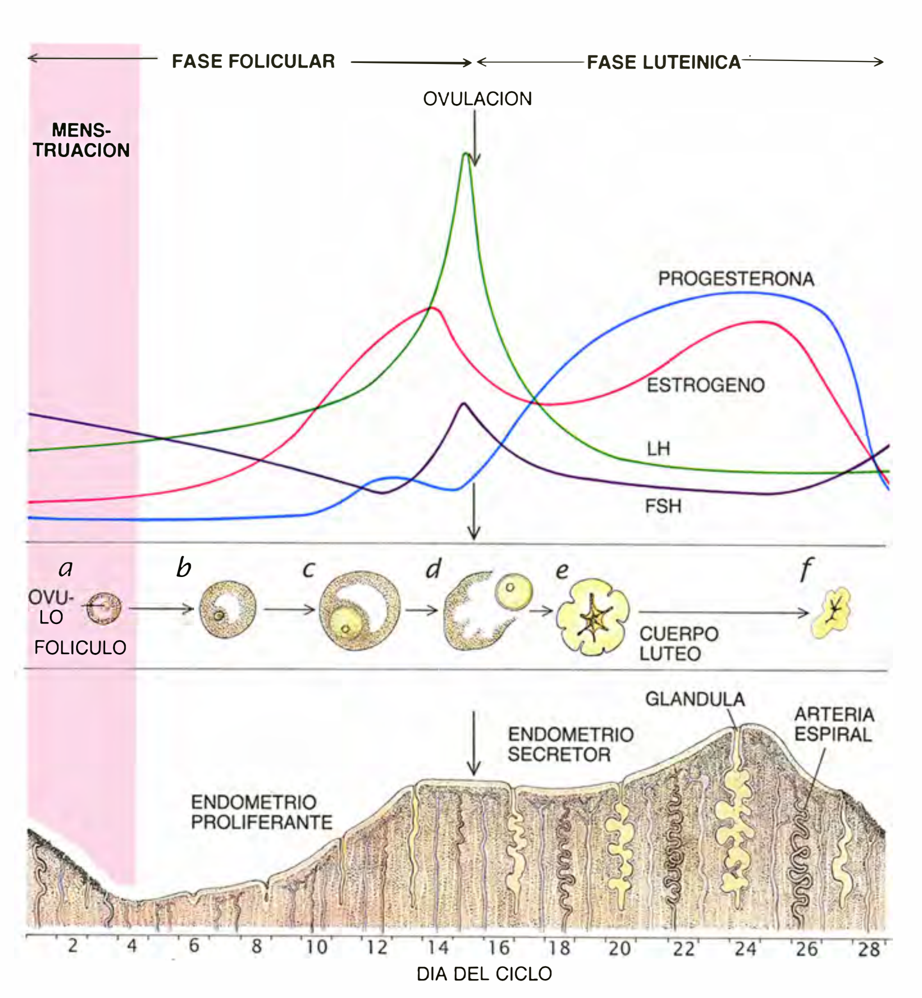
En muchos casos, la molécula que se une vigorosamente a un receptor es un agonista: producirá los mismos efectos que el ligando natural. Por tanto, Teutsch decidió valorar si esto era también aplicable para las nuevas creaciones. Como se encargaba de la investigación de los glucocorticoides, solicitó a los farmacólogos que examinaran la actividad de una molécula denominada RU 25055, que presentaba una afinidad muy elevada por el receptor de glucocorticoides.

La RU 25055 no se comportó según cabía esperar. Cuando se la mezcló con células que responden a los glucocorticoides, no se producía ninguna actividad glucocorticoidea detectable; por ejemplo, una restricción de células del timo. Se trataba, eso sugería el hallazgo, de un genuino antagonista de los glucocorticoides. Trabada a los receptores de los glucocorticoides sin inducir los efectos habituales, la molécula podía evitar que tales efectos se produjeran o impedir que lo hicieran con su intensidad normal.

Después de este descubrimiento, Teutsch y sus colaboradores invirtieron gradualmente sus primeras hipótesis acerca de las relaciones entre afinidad de unión y actividad de estas series moleculares. Sospecharon que las moléculas que presentaban mayor afinidad por el receptor glucocorticoideo serían las que ejercerían el efecto antagonista, y no el agonista, éste menos intenso. Era una hipótesis sugestiva, pues permitía vislumbrar aplicaciones terapeúticas, muy interesantes y específicas para los antagonistas. A modo de ejemplo: un antagonista de los glucocorticoides administrado tópicamente podría acelerar la cicatrización de las quemaduras u otras lesiones cutáneas contrarrestando la tendencia de los glucocorticoides a dificultar la curación de las heridas.

Hacia finales de 1979, Edouard Sakiz, un ejecutivo de la compañía, elaboró un proyecto de investigación formal para el desarrollo de antagonistas de los glucocorticoides. En él participaban dos de nosotros (Teutsch y Philibert), otros empleados de la compañía y dos asesores externos: Sir Derek H. R. Barton, ganador en 1969 del premio Nobel de química, y Baulieu, una autoridad en materia de actividad esteroidea. Uno de nosotros (Philibert) coordinaba el proyecto y supervisaba los estudios de actividad biológica.

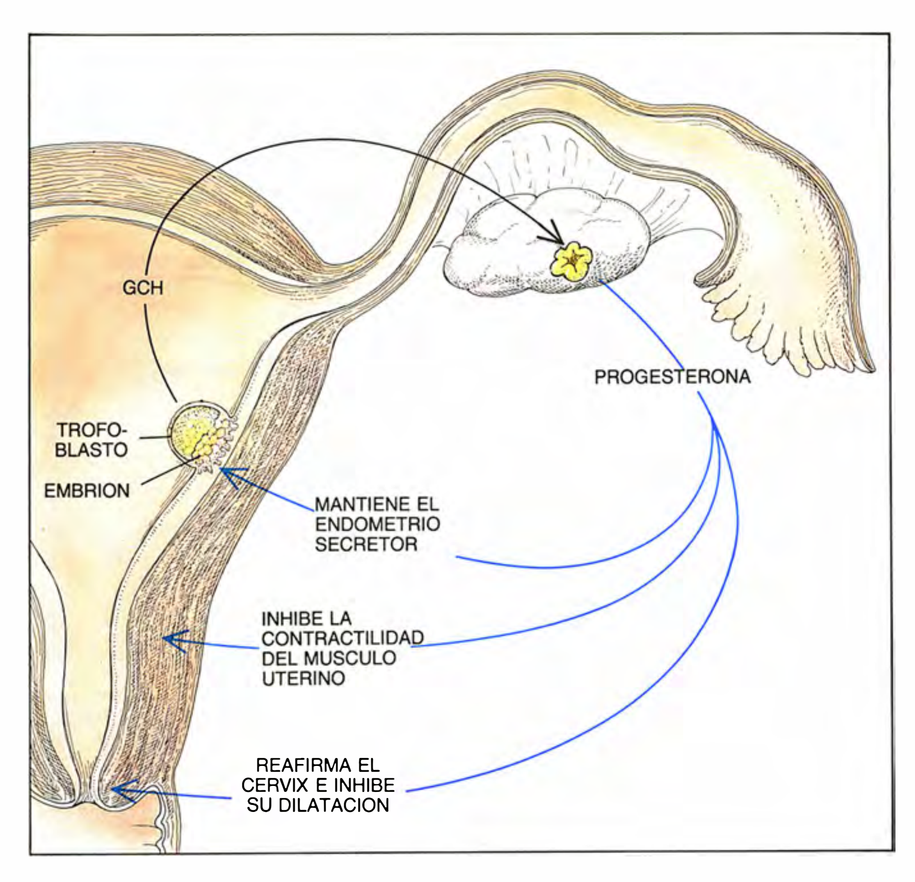
En abril de 1980, se habían sintetizado ya tres moléculas del nuevo proyecto: RU 38140, RU 38473 y RU 38486; esta última se llamará más tarde RU 486. Todas se trababan con fuerza al receptor de glucocorticoides y todas bloqueaban determinadas funciones de los glucocorticoides en las células en cultivo. De las tres, la última era la más potente. Resultó también la más eficaz en su oposición a la actividad de un glucocorticoide sintético muy potente: la dexametasona.

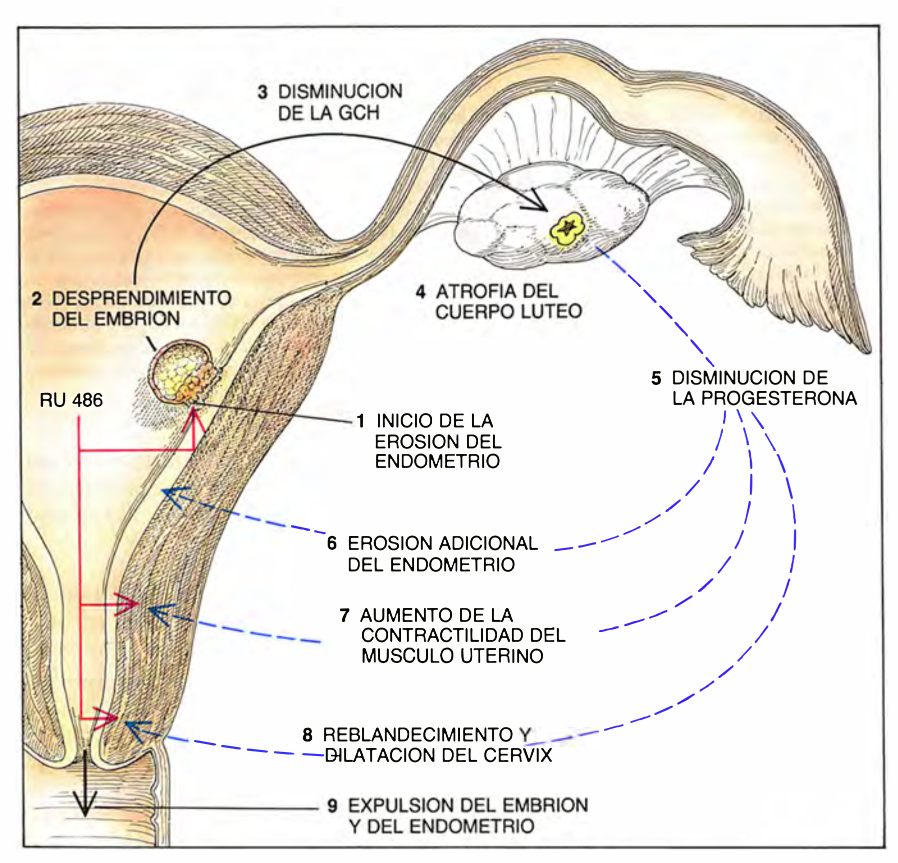


3. CICLO MENSTRUAL, regulado por varias hormonas (*arriba*). Al final de un ciclo, la hipófisis aumenta la secreción de la hormona folículo-estimulante (FSH), que actúa sobre el ovario (*centro*) donde activa el desarrollo de un folículo inmaduro (*a*). En la primera mitad del nuevo ciclo, el folículo maduro (*b* y *c*) segrega estrógeno, que mantiene el crecimiento folicular, estimula la proliferación del revestimiento uterino (*abajo a la izquierda*) y sensibiliza dicho revestimiento a la progesterona. A mitad del ciclo, la aparición de otro factor hipofisario, la hormona luteinizante (LH), desencadena la ovulación (*d*). En la segunda mitad del ciclo, el resto del folículo del ovario se transforma en el cuerpo lúteo (*e*), que produce progesterona y estrógeno. La progesterona convierte al endometrio en un tejido secretor muy vascularizado (*abajo a la derecha*), preparado para recibir y nutrir a un óvulo fecundado. Si no se produce la fecundación, el cuerpo lúteo termina por degenerar (*f*) y la disminución consecuente en progesterona produce la erosión de la cubierta endometrial. A continuación se produce un sangrado y el ciclo comienza de nuevo. (Dibujos realizados por Carol Donner.)

Pero no acababa en la actividad antiglucocorticoidea de la RU 486 su perfil diferenciador. Los estudios de Philibert acerca de la afinidad de esa molécula por las cinco clases de receptores esteroideos evidenciaban su fortísima unión con el receptor de la progesterona. Las primeras pruebas con distintas especies animales demostraron que la RU 486 era antagonista de la progesterona.

Así se descubrió, de manera inesperada, el antagonista de la progesterona que desde hacía tanto tiempo buscaban los científicos y los clínicos





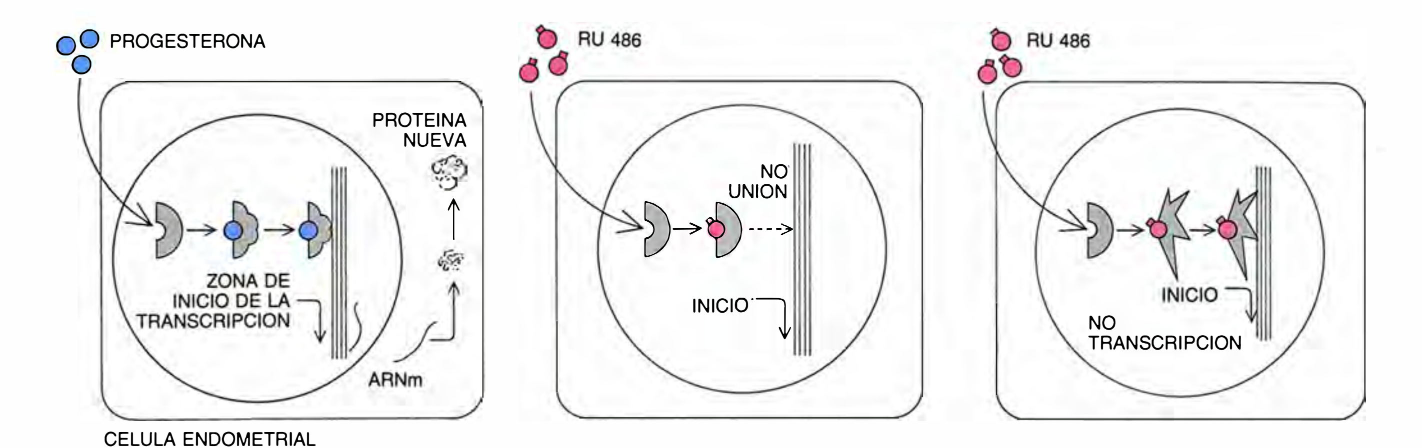
4. RU 486 aborta la gestación oponiéndose a la acción de la progesterona en distintas zonas del útero. En un embarazo normal (*arriba*), el trofoblasto (futura placenta) segrega gonadotropina coriónica humana (GCH), que mantiene el cuerpo lúteo. La progesterona secretada por el cuerpo lúteo tiene diversos efectos que mantienen el embarazo. Cuando la RU 486 bloquea la acción de la progesterona (*abajo*), el endometrio se erosiona y el embrión se desprende y es expulsado con el tejido endometrial.

interesados en el control de la natalidad. Baulieu, cuyas aficiones en ese terreno venían de lejos, comprendió enseguida el alcance del descubrimiento, y convenció a la compañía Roussel-Uclaf para que continuara la investigación de una sustancia antiprogesterona para controlar la fertilidad. Así empezaron los ensayos de laboratorio con el fin de consolidar la eficacia abortiva de la RU 486.

La compañía se basó también para continuar la investigación de la actividad antiprogesterona de la RU 486 en el descubrimiento de la afinidad *in vitro* de la RU 486 por el receptor de la progesterona: la mostrada por la propia progesterona. Esta actividad sugería que la molécula sintética competiría con ventaja con la progesterona en el organismo y "ganaría el favor" del receptor la mayoría de las veces. Los estudios con células en cultivo apoyaban esta idea, demostrando que se podía bloquear los efectos de la progesterona en las células efectoras cuando se exponían a una pequeña cantidad de RU 486.

La verdadera prueba que valora la eficacia de un compuesto es su actividad *in vivo*; los resultados de los primeros estudios con animales se mostraban esperanzadores. Se examinaron, por ejemplo, los efectos de la sustancia sobre el endometrio de conejas inmaduras. Se les inyectaba una dosis de estradiol, estrógeno que estimula el crecimiento del endometrio e induce la síntesis celular de receptores de progesterona. A continuación, se les administraba a algunas hembras progesterona, que transformaba el endometrio proliferante en tejido secretor. A otras se les administraba RU 486 por vía oral. La exposición a solo RU 486 no inducía esa transformación. Más aún; cuando se administraba simultáneamente RU 486 y progesterona, el nuevo compuesto bloqueaba la capacidad de la progesterona para producir el cambio del estado proliferativo al secretor, tal y como sería de esperar de un antagonista de la progesterona.

Estos hallazgos *in vivo* eran importantes, pero quedaba todavía una cuestión fundamental por resolver cuando la Roussel-Uclaf decidió examinar el potencial de la RU 486 como droga antiprogesterona: ¿Podía esa actividad antagonista ya demostrada provocar la interrupción del embarazo? Los estudios con ratas hembra, que no tienen un ciclo menstrual, confirmaron esa posibilidad, y los experimentos con hembras de la especie *Macaca fascicularis*, que sí presentan



5. ACCION DE LA PROGESTERONA en el interior de la célula (*izquierda*). Al ocupar su receptor en el núcleo, la hormona modifica la forma del mismo, permitiendo que se una a la cromatina (ADN y proteínas asociadas). Dicha unión causa la transcripción del gen y la síntesis de proteínas. El compuesto químico RU 486 antagoniza estos efectos ocupando el receptor sin estimular la transcripción génica. El bloqueo de la transcripción podría resultar de la no inducción del cambio en la forma del receptor necesario para que se una a la cromatina (*recuadro del centro*) o bien se produce quizá un cambio en la forma que permite dicho engarce, aunque impide la unión a los factores necesarios para la transcripción (*derecha*).

dicho ciclo, aportaron nuevas pruebas.

Los primeros estudios con monos se realizaron con hembras sin preñar y demostraron que una única dosis oral o parenteral de RU 486 durante la segunda mitad del ciclo inducía la aparición de un período menstrual prematuro a las 48 horas después de la administración. Posteriormente, Gary D. Hodgen y sus colaboradores, de la facultad de medicina de la Universidad de Virginia del Este, demostraron que el compuesto podía también interrumpir el embarazo en monos. Otros ensayos con animales comprobaron que la RU 486, incluso a altas dosis, no presentaba efectos tóxicos.

Tales estudios avalaban la puesta en marcha de ensayos clínicos. En el mes de octubre de 1981 Baulieu sugirió a uno de sus colaboradores, Walter Herrmann, del Hospital Clínico de Ginebra, someter a prueba la RU 486 en mujeres voluntarias. Los resultados fueron positivos: la RU 486 provocó la expulsión del embrión del útero en nueve de once mujeres.

Pronto se realizaron nuevas investigaciones clínicas bajo la supervisión de la Roussel-Uclaf, la Organización Mundial de la Salud y el Consejo de la Población, una organización no lucrativa con sede en Nueva York. Uno de nosotros (Ulmann) dirigió los ensayos clínicos realizados por la Roussel-Uclaf.

En 1985 se llevaron a cabo los primeros estudios a gran escala para determinar la posología más eficaz. Se concluyó que una dosis de 600 miligramos de RU 486 resultaba la más segura. En el curso de estos estudios se llegó a un consenso acerca de cuál podía ser la utilización eficaz de la sustancia. En síntesis, el uso de la RU 486 podía reputarse afortunado si no se precisaba cirugía, es decir, si se expulsaban el embrión y todas las capas del endometrio, excepto la más interna. (Las expulsiones incompletas requieren intervención quirúrgica, un aspirado por lo común, ya que los tejidos humanos retenidos pueden provocar infecciones.)

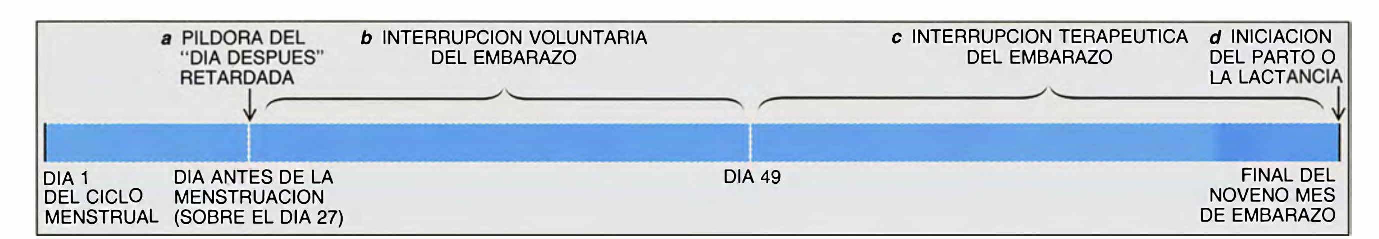
Según este baremo, la administración aislada de la RU 486 se consideraba atinada con su 80 por ciento de éxito. Los estudios pusieron también de manifiesto que el método era eficaz sólo durante las primeras fases del embarazo, hasta la primera semana después de la fecha en que debería haberse iniciado la menstruación. Considerando que muchas mujeres se someten a la prueba de embarazo sólo después de que haya transcurrido ese plazo, resultaba obvio que las aplicaciones de la RU 486 en solitario eran limitadas.

¿A qué se debía ese 20 por ciento de fracasos? Una hipótesis razonable era que el antagonismo contra la progesterona no podía, por sí mismo, inducir las contracciones uterinas sostenidas e intensas necesarias para la expulsión completa del embrión y las capas endometriales. Para salir al paso de esa dificultad, Mark A. Bygdeman, del Instituto Karolinska de Estocolmo, que estaba supervisando un ensayo clínico, propuso añadir una pequeña dosis de prostaglandina al protocolo. Previamente, había demostrado que la RU 486 aumentaba la sensibilidad del músculo uterino a los efectos contráctiles de las prostaglandinas.

Siguiendo las sugerencias de Bygdeman, se iniciaron nuevos ensayos clínicos en Francia, Gran Bretaña, Suecia y China para valorar un nuevo protocolo: 600 miligramos de RU 486, administrados en una única dosis, y una dosis de prostaglandina a las 36 o 48 horas. El intervalo no podía acortarse, porque RU 486 tarda algún tiempo en sensibilizar el músculo uterino a las prostaglandinas.

Los resultados mejoraron radicalmente. La proporción de logros alcanzó el 96 por ciento, próxima a la obtenida mediante cirugía, que tampoco es totalmente infalible. En estos estudios también se valoraron los efectos de la combinación de ambas sustancias en embarazos algo más avanzados —hasta tres semanas después de la falta de la menstruación— y demostraron que se podía alcanzar el mismo porcentaje de resultados positivos. En la mayoría de los casos, el embrión y todos los fragmentos endometriales se expulsaban durante las 24 horas siguientes a la administración de la prostaglandina.

Lo mismo que en los abortos espontáneos, en los que se interrumpe el embarazo de forma involuntaria, la expulsión del embrión y de las capas endometriales se acompañaba de una inevitable hemorragia uterina. De un 4 a 5 por ciento de las que se prestaron a esos ensayos, el sangrado fue intenso, como también puede ocurrir en un aborto espontáneo normal. En algunos casos, se necesitaba una intervención quirúrgica para interrumpir la hemorragia y, en casos excepcionales, era obligada la transfusión.



6. APLICACIONES DE LA RU 486 en el control de la fertilidad y en la obstetricia. El compuesto podría servir como píldora "del día después" (*a*) a tomar el día antes del que debiera empezar la menstruación. En Francia, este compuesto se administra junto a una droga, una prostaglandina, para interrumpir embarazos de hasta 49 días de duración (*b*). La combinación de ambas sustancias permite también la interrupción de embarazos más avanzados (*c*). Estudios realizados con monos demuestran que el químico preparado RU 486 puede facilitar el parto a término sensibilizando al útero a la oxitocina, un agente inductor del parto; también sugieren que el compuesto puede estimular la lactación (*d*). Otras aplicaciones de la RU 486 consideradas son el tratamiento de cánceres que portan receptores de progesterona, entre ellos algunos de mama y como antagonista glucocorticoideo.

Ante el riesgo de hemorragia, dedujíase que las prostaglandinas debían administrarse en un centro sanitario donde someter a vigilancia a las mujeres durante algunas horas y, en caso de necesidad, intervenir.

Los estudios clínicos demostraron la aparición de dolores abdominales, producidos fundamentalmente por los efectos contráctiles de las prostaglandinas. También se puso de manifiesto que la dosis de 600 miligramos de RU 486 necesaria para abortar no se acompañaba de ningún antagonismo clínico significativo contra los glucocorticoides. Por tanto, no existía la posibilidad de que la RU 486 presentara efectos antiglucocorticoideos lesivos, como fatiga intensa y alteraciones de los niveles de electrolitos y glucosa en sangre.

Una vez se completaron y revisaron estos estudios, la Roussel-Uclaf solicitó a las autoridades políticas francesas el permiso para comercializar la sustancia. Este se concedió el 23 de septiembre de 1988. RU 486 está regulada por la legislación francesa sobre el aborto, en la que se estipula que el mismo sólo pueden realizarlo centros autorizados. Existe una restricción adicional en el caso de la RU 486. Aunque las leyes permiten la interrupción voluntaria del embarazo hasta la duodécima semana, la utilización de la RU 486 se limita hasta la séptima semana de gestación, ya que este es el tope considerado en los estudios de protocolo.

Desde el otoño de 1988, se han llevado a cabo más de 40.000 abortos utilizando la combinación de RU 486 y una prostaglandina. En un estudio reciente, publicado en marzo de este año, sobre 2115 mujeres, se ha confirmado la proporción del 96 por ciento de eficacia y el 4 o 5 por ciento de hemorragias intensas. En ese trabajo también se demostraba que, en un 86 por ciento de las interrupciones eficaces, la expulsión tenía lugar dentro de las 24 horas siguientes a la administración de prostaglandina.

La duración media del sangrado en las mujeres era de nueve días. Sin embargo, el tiempo de expulsión, la duración de la hemorragia y la intensidad de los dolores variaban a tenor de la dosis de prostaglandinas. Una dosis elevada se asociaba con expulsión más rápida, pero también con hemorragia prolongada e intensidad de los dolores.

Por otro lado, los médicos especialistas en este campo han informado que dos mujeres de entre todas las que recibieron RU 486 en Francia presentaron complicaciones graves en la función cardíaca después de administrárseles la prostaglandina. Se trata de un suceso infrecuente y ambas mujeres sobrevivieron, pero el hecho sugiere que las prostaglandinas deben administrarse con precaución en mujeres con enfermedades cardíacas o que presentan un elevado riesgo de padecerlas, como es el caso de las fumadoras empedernidas.

Ha transcurrido ya una década desde que se sintetizó la RU 486. El compuesto ha empezado a satisfacer su potencial como método no quirúrgico para la interrupción de embarazos en fases iniciales, pero esta es sólo una de sus muchas aplicaciones relacionadas con el control de la fertilidad y la obstetricia.

En teoría, la RU 486 podría tomarse como una píldora "del día después", es decir, en el día 27 de un ciclo menstrual típico de 28 días. Como la sustancia no siempre es eficaz en estos casos, la mujer debe someterse a un examen pasados de 10 a 15 días para confirmar que no está embarazada. Por las mismas razones, este compuesto no sirve de control rutinario de la natalidad después del coito.

También podría tener aplicación entre las mujeres que deciden acabar con un embarazo en fases iniciales mediante un aspirado. En diferentes estudios clínicos se ha puesto de manifiesto que la manipulación se facilita con la administración de RU 486 entre 36 y 48 horas antes. El compuesto contribuye reblandeciendo y dilatando el cérvix.

En embarazos más avanzados, hasta alcanzado el tercer trimestre, la combinación de RU 486 y prostaglandina podría representar una opción alternativa a la cirugía cuando se decide abortar porque el feto presenta malformaciones graves o la salud de la madre se encuentra en peligro. Los ensayos han demostrado que esta solución resulta eficaz en embarazos avanzados y tiene, de hecho, menos riesgos para la madre que los diferentes tipos de manipulación quirúrgica a los que suele recurrirse pasado el primer trimestre. La combinación de ambas sustancias podría también ser efectiva cuando el feto muere intraútero. En tales casos, el feto se expulsa generalmente por la vagina y las contracciones se suelen producir con muchas dificultades. Parece que la administración de RU 486 seguida de prostaglandina facilita la expulsión del feto.

Los estudios con monos sugieren que la RU 486 puede facilitar el parto en el embarazo a término. Se ha comprobado que, en animales, aumenta los efectos promotores del parto de la oxitocina, una hormona hipofisaria que se administra frecuentemente en altas dosis en caso de parto difícil para estimular las contracciones uterinas. Hodgen ha descubierto que, después de la administración de RU 486, la frecuencia de las contracciones uterinas se puede aumentar con una pequeña dosis de oxitocina. Por tanto, la RU 486 podría servir para evitar algunos partos por cesárea. Los experimentos de

Hodgen sugerían también otra función de la RU 486: en monos, al menos, desencadena la lactación y aumenta el volumen de leche que se produce en los pechos.

Fuera del campo de la obstetricia, la RU 486 podría servir en el futuro para el tratamiento de los cánceres que portan receptores de progesterona, entre los que se incluyen algunos cánceres de mama. En estudios realizados en tubos de ensayo, se ha observado que la RU 486 reduce el ritmo de crecimiento de los tumores que presentan dichos receptores. Ciertos tumores benignos que sintetizan receptores para la progesterona se podrían controlar o reducir con ayuda de la RU 486, entre ellos los meningiomas (tumores de las meninges o membranas que rodean al cerebro). Actualmente, se están llevando a cabo ensayos clínicos en los que se valoran las posibles aplicaciones en tumores malignos y benignos.

Por último, la RU 486 podría hallar aplicación en un futuro próximo como antagonista glucocorticoideo. En este sentido se está estudiando su empleo en el tratamiento del síndrome de Cushing, una alteración resultante de la superproducción de cortisona y que provoca hipertensión, almacenamiento rápido de grasa en el tronco superior y osteoporosis.

La RU 486, el primer antagonista de la progesterona que ha sido comercializado, tiene una utilidad potencial que va más allá del aborto, uso que constituye sólo el primer capítulo de la historia del compuesto.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ANTIPROGESTIN STEROID RU 486 AND HUMAN FERTILITY CONTROL. Dirigido por Etienne-Emile Baulieu y Sheldon J. Segal. Plenum Press, 1985.

ANTIPROGESTERONES IN OBSTETRICS, ECTOPIC PREGNANCIES AND GYNAECOLOGICAL MALIGNANCY. André Ulmann y Catherine Dubois en *Antihormones in Clinical Gynaecology*. Dirigido por D. Healy. Baillière Tindall, 1988.

MOLECULAR MECHANISM OF ANTISTEROID HORMONES AT THE RECEPTOR LEVEL. Etienne-Emile Baulieu en *Kidney International*, vol. 34, suplemento 26, págs. S2-S7; octubre de 1988.

VOLUNTARY INTERRUPTION OF PREGNANCY WITH MIFEPRISTONE (RU 486) AND A PROSTAGLANDIN ANALOGUE: A LARGE-SCALE FRENCH EXPERIENCE. Louise Silvestre, Catherine Dubois, Maguy Renault, Yvonne Rezvani, Etienne-Emile Baulieu y André Ulmann en *New England Journal of Medicine*, vol. 322, n.º 10, págs. 645-648; 8 de marzo de 1990.

Plutón

El noveno planeta tiene una enorme luna, una superficie cubierta de metano congelado y una tenue atmósfera que puede caer periódicamente en forma de nieve. ¿Nos hallamos ante una reliquia de la formación del sistema solar?

Richard P. Binzel

Aunque el 18 de febrero de este año se cumplió el sexagésimo aniversario del descubrimiento de Plutón, el noveno planeta del sistema solar ha sabido guardar celosamente sus secretos. Mundo frígido, pequeño y distante, semeja una mancha uniforme, incluso visto a través del mayor de los telescopios asentados en la Tierra. Es, también, el único planeta que no ha recibido la visita de los vehículos espaciales.

Pese a esas dificultades, de 10 años a esta parte comienza a dibujarse una nueva imagen de Plutón. Una tenaz observación que maneja una rica batería de modernos instrumentos, y la fortuna de algunos alineamientos celestes fortuitos, han proporcionado bastantes sorpresas. Plutón tiene un satélite, Caronte, cuyo enorme tamaño permite considerar ambos objetos como si de un planeta doble se tratara. El planeta presenta brillantes casquetes polares y una región ecuatorial más oscura y moteada. Una capa de hielo de metano cubre la mayor parte de su superficie. Plutón posee incluso una delgada atmósfera; cuando el planeta se encuentra más alejado del Sol, toda la atmósfera o parte de ella puede congelarse, precipitando en forma de nieve sobre la superficie. Muy diferente de la de Plutón, así parece, la superficie de Caronte podría ser una gran extensión de hielo de agua.

Por tamaño y densidad, Plutón semeja Tritón, el gran satélite de Neptuno que recibió recientemente la visita de la sonda espacial *Voyager 2*. Sumadas a otras afinidades, todas ellas sugieren que ambos cuerpos podrían ser restos planetesimales, reliquias de los albores del sistema solar, que se salvaron de la absorción por parte de los gigantescos planetas exteriores. En ese marco de acontecimientos, Neptuno capturó a Tritón mientras que Plutón se las arregló para sobrevivir como planeta genuino en órbita independiente en torno al Sol.

Clyde W. Tombaugh vio a Plutón en el curso de una metódica exploración fotográfica alentada por Percival Lowell, acomodado bostoniano con un apasionado interés por la búsqueda de un posible planeta transneptuniano. Se hizo evidente de inmediato que Plutón tenía sus rarezas. Los demás planetas exteriores describen órbitas aproximadamente circulares en torno al Sol, pero la de Plutón, altamente elíptica, va desde 30 o 50 veces la distancia Tierra-Sol hasta quedar más cerca del Sol que Neptuno. En esa situación está, en efecto, desde 1979; recuperará su condición de planeta remotísimo en 1999. Su órbita está inclinada 17 grados respecto al plano de la órbita terrestre, mucho más que la de cualquier otro planeta.

Salvo su órbita y algunas otras características, no se pudo determinar, con algún grado de certidumbre, nada más del planeta en los 50 años subsiguientes a su descubrimiento. Lowell y otros habían postulado la existencia de un noveno planeta basándose en las perturbaciones gravitatorias percibidas en los movimientos de Urano y Neptuno; aventuraron que el planeta en cuestión decuplicaría la masa de la Tierra. Pero resultó que Plutón brillaba mucho menos de lo esperado, lo que implicaba una masa mucho menor de lo predicho. Suponiéndole una densidad planetaria razonable, las estimaciones de la masa de Plutón se dividieron por 10. En los años sesenta, los astrónomos refinaron sus mediciones de las órbitas de Urano y Neptuno, y la masa estimada de Plutón se volvió a dividir por 10.

La determinación del diámetro de Plutón se convirtió en otra tarea frustrante. Las capas en movimiento de la atmósfera terrestre distorsionan la luz incidente. La turbulencia atmosférica limita la resolución de los telescopios ópticos de la Tierra hasta un segundo de arco (1/3600 de grado), aproximadamente. Visto desde nuestro planeta, el disco de Plutón tiene un diámetro muy por debajo del segundo de arco; dicho de otro modo: las estimaciones de su diámetro eran altamente subjetivas. A lo largo de los años, han oscilado entre 0,5 y 0,2 segundos de arco, lo que corresponde a diámetros de 14.000 a 6000 kilómetros. Este último valor, casi la mitad del terrestre, se aceptó por la mayoría.

Las estimaciones de masa y diámetro implicaban una densidad similar a la de los planetas terrestres rocosos del sistema solar interior y apre-

RICHARD P. BINZEL es profesor de geofísica, física de la atmósfera y física planetaria en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. En 1986 obtuvo el doctorado en astronomía por la Universidad de Texas en Austin. Publicó su primer trabajo científico a la edad de 15 años y, desde entonces, mantiene la misma pasión por la investigación astronómica. Ha realizado estudios observacionales y teóricos de la estructura, comportamiento y evolución de los asteroides, cuyos resultados pueden leerse en *Asteroids II*, libro del que es coautor.

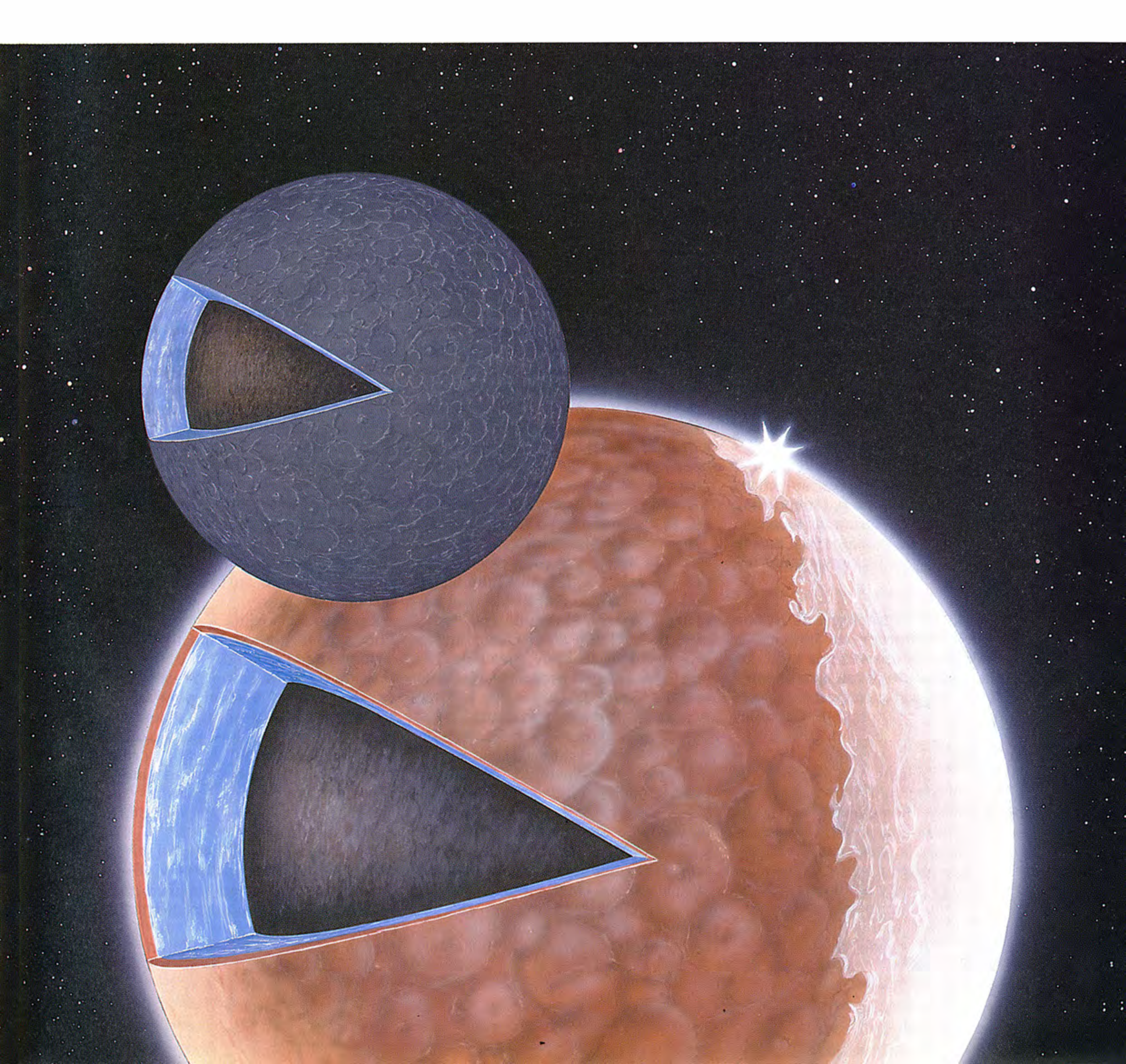
1. PLUTON Y CARONTE tienen un aspecto sorprendentemente distinto. El metano congelado de la superficie de Plutón se ha vuelto rojizo a causa de la radiación solar. La menor gravedad de Caronte permitió escapar al metano, dejando descubierta una superficie de hielo de agua. Ambos cuerpos poseen grandes núcleos rocosos; es evidente, pues, que hubo procesos que favorecieron la formación de compuestos rocosos frente a los hielos en el sistema solar exterior. En 1988, una estrella, ocultada por Plutón, centelleó antes de desaparecer, prueba de la existencia, en el planeta, de una atmósfera tenue y brumosa. Desde 1985, Caronte ha pasado por delante y por detrás de Plutón; al hacerlo, permitió las primeras mediciones precisas de su planeta.

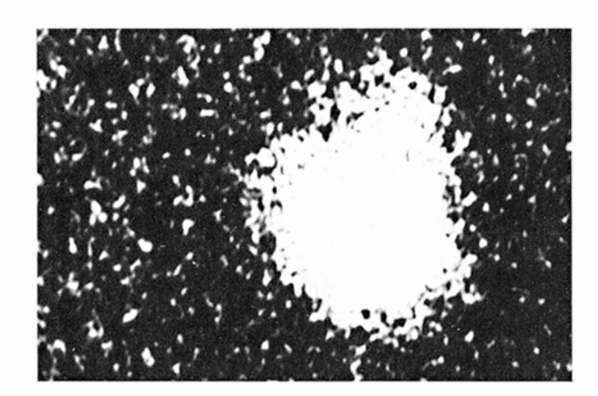
ciablemente mayor que la de los planetas exteriores gaseosos. Mediada la década de los setenta, se hizo evidente que Plutón constituía un cuerpo gélido, muy reflector y quiza menor y menos denso de lo supuesto.

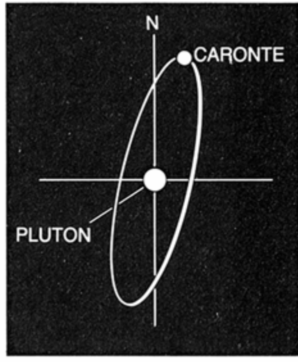
En 1978 las ideas sobre Plutón sufrieron un vuelco. James W. Christy, del Observatorio Naval de los EE.UU., descubrió que tenía un gran satélite, cuando se hallaba realizando mediciones precisas de la posición de Plutón para refinar la definición de su órbita. Tales mediciones, de importancia capital para la astronomía, constituyen una tarea tediosa y rara vez gratificante. Christy estaba examinando placas fotográficas de Plutón tomadas con el telescopio de 1,5 metros del Observatorio Naval en Flagstaff (Arizona), a escasos kilómetros del lugar donde Tombaugh divisó Plutón.

En una de las placas, Christy halló que las imágenes del planeta mostraban una ligera protuberancia hacia la parte alta; pero las imágenes de las estrellas en la placa eran redondas. Otras placas tomadas en diferentes noches mostraron que la protuberancia se movía alrededor del planeta con un período de 6,4 días, el mismo que el ya conocido período de rotación de Plutón. Con su colaborador Robert S. Harrington, Christy cayó en la cuenta de que aquella "protuberancia" era un satélite cuya órbita se halla gravitatoriamente sincronizada con la rotación del planeta. En virtud de esa órbita, Plutón y Caronte mantienen, de forma permanente, los mismos hemisferios frente a frente (así como la Luna muestra siempre la misma cara, vista desde la Tierra). Christy propuso llamar al satélite Caronte (Charon, en inglés), por una doble coincidencia: el nombre de su esposa, Charlene, y el del barquero de la mitología griega, Caronte, quien transportaba las almas a través de la laguna Estigia hasta el mundo inferior, gobernado por el dios Plutón.

Los expertos en física planetaria recibieron con alborozo el descubrimiento de Caronte, porque permitía por fin un cálculo preciso de la masa de Plutón. Para dos objetos en mutua







2. CARONTE fue detectado como un abultamiento de la imagen de Plutón, el mismo que se observa en esta fotografía tomada en el Observatorio Naval de los Estados Unidos el 2 de julio de 1978 (*izquierda*). James W. Christy advirtió que esa deformación correspondía a un objeto en órbita alrededor del planeta. La escala real de los dos cuerpos ha quedado distorsionada por la atmósfera terrestre, pero se puede determinar por otros métodos indirectos (*esquema de la derecha*).

órbita, el período de la órbita está determinado por la distancia entre los cuerpos, la suma de sus masas y las leyes de la gravitación. Las mediciones de la órbita de Caronte revelaron que la masa total del sistema Plutón-Caronte es aproximadamente 1/400 de la masa de la Tierra, de nuevo dividiendo por 10 la mayoría de las estimaciones previas. Las mediciones posteriores sólo han retocado ligeramente este valor.

Poco después del descubrimiento de Caronte, los astrónomos conocieron que, durante el recorrido de Plutón alrededor del Sol, que tarda 248 años, la alineación entre la Tierra y Plutón provoca, dos veces en ese lapso, que la órbita de Caronte se vea de perfil. Cuando eso ocurre, Caronte pasa por delante y detrás de Plutón a intervalos de 3,2 días (cada media órbita). Esos sucesos mutuos reciben el nombre común de eclipses, aun cuando el disco de Caronte sea menor que el de Plutón; en términos técnicos, debe hablarse de tránsitos (si Caronte está delante) y ocultaciones (si se halla detrás).

Rompiendo la tradición de lo que suele acontecer en fenómenos que sólo se dan una vez por siglo, los astrónomos no tuvieron que esperar mucho para presenciar esos eclipses mutuos. Las primeras predicciones indicaban que los eclipses podían comenzar al cabo de sólo uno o dos años del descubrimiento de Caronte. A medida que se fueron refinando las mediciones de la inclinación de la órbita del satélite, la predicción del comienzo de los sucesos mutuos se situaba en la primera mitad de los años ochenta. Si Christy no hubiera observado el abultamiento en sus placas fotográficas, la actual serie de eclipses habría pasado, quizás, inadvertida.

La inminencia de los eclipses originó en la comunidad astronómica no menos revuelo que el levantado por el descubrimiento de Caronte. Se nos hace difícil imaginar un mejor experimento natural para establecer los diámetros y las propiedades de las superficies de Plutón y Caronte. La cronología de los comienzos y finales de los eclipses permite conocer los diámetros de ambos cuerpos. Ello, combinado con las nuevas determinaciones de la masa total del sistema, nos proporciona la densidad de Plutón, un dato crucial para poner en claro su estructura interna y formación.

El brillo conjunto de Plutón y Caronte varía al cubrir el satélite porciones claras y oscuras de la superficie del planeta y viceversa. Los repetidos tránsitos y ocultaciones nos permiten cartografiar, aunque toscamente, un hemisferio de cada cuerpo. Las ocultaciones de uno y otro dejan medir sus respectivos espectros y conocer, así, la composición de su superficie.

Los físicos planetarios se aprestaron a la acción para aprovechar esa ocasión única. J. Derral Mulholland, de la Universidad de Florida, y el autor comenzaron el seguimiento sistemático de Plutón en el Observatorio McDonald de la Universidad de Texas. Aplicados en proyectos similares estaban David J. Tholen, de la Universidad de Hawai, y Edward F. Tedesco, del Laboratorio de Propulsión a Chorro en Pasadena (California). Nuestras observaciones consistían principalmente en mediciones telescópicas del brillo de Plutón con una precisión de décimas por cien. Plutón y Caronte aparecen en los telescopios terrestres como una única imagen superpuesta; un eclipse produciría un descenso en el brillo conjunto cuando parte de la superficie total quedase escondida tras el satélite o el planeta.

En los primeros eclipses, Plutón y Caronte sólo pasarían rozándose. El brillo cambiaría apenas en algunos puntos de porcentaje. Detectar el comienzo de los sucesos mutuos requería, por tanto, un conocimiento minucioso de las variaciones periódicas del brillo de Plutón que se producen cuando éste gira. Tales variaciones, presumiblemente causadas por zonas claras y oscuras de la superficie, fueron detectadas en los años cincuenta; gracias a las mismas se determinó el período de rotación de 6,4 días del planeta. Conviene anotar que, a medida que Plutón se ha ido acercando al perihelio —su punto más próximo al Sol—, la amplitud de las fluctuaciones ha aumentado desde el 10 hasta el 30 por ciento, mientras que el brillo absoluto del planeta ha disminuido en torno a un 30 por ciento.

Este comportamiento es, casi con certeza, resultado de la geometría variable entre Plutón y la Tierra y del insólito ángulo de inclinación del eje de rotación de Plutón. La mayoría de los planetas giran alrededor de un eje que es aproximadamente perpendicular al plano de sus órbitas; lo hacen en sentido antihorario (progrado), vistos desde encima del plano del sistema solar.

El descubrimiento de Caronte permitió determinar el ángulo de inclinación del eje de Plutón, porque las fuerzas gravitatorias que sincronizaron la órbita del satélite con la rotación del planeta alinearon también el plano de la órbita de Caronte con el ecuador de Plutón. La medición de la órbita del satélite reveló que el eje de Plutón está inclinado 122 grados. El planeta se halla "cabeza abajo", y su polo norte (definido por la rotación antihoraria) cae por debajo del plano de su órbita. Venus y Urano están inclinados de manera semejante, con inclinaciones de 177 y 98 grados respectivamente.

La extrema inclinación del eje de Plutón hace que su aspecto cambie bastante en el curso de su órbita, observado desde la Tierra. A principios del decenio de 1950, el polo sur de Plutón apuntaba aproximadamente hacia la Tierra. El movimiento orbital del planeta alrededor del Sol ha cambiado algo esa orientación, de suerte que los observadores terrestres ven ahora a Plutón desde una perspectiva más ecuatorial.

Robert L. Marcialis, de la Universidad de Arizona, y Marc W. Buie, del Instituto del Telescopio Espacial, se han esforzado por reconstruir la distribución de manchas oscuras y claras en la superficie de Plutón para

ajustar los cambios observados en el brillo del planeta según el aspecto que dejan ver.

Las manchas oscuras y claras responsables de las variaciones de 6,4 días en la luz de Plutón parecen estar situadas a bajas latitudes, donde entran y salen del campo de visión conforme gira el planeta. El oscurecimiento del planeta a largo plazo sugiere que las regiones polares del planeta tienen un albedo, o reflectividad, bastante alto. Plutón brillaba más en los años cincuenta porque su reflectante polo sur apuntaba hacia la Tierra. La mayor parte de esta región era siempre visible; cada rotación causaba, pues, sólo una ligera variación en el brillo de Plutón. A medida que la zona ecuatorial, más oscura y menos uniforme, entró en el campo de visión, Plutón perdió luminosidad y aumentaron sus fluctuaciones de brillo [*véase la figura 4*].

Desconocemos qué contribución aporta Caronte a la curva rotacional de luz observada. En el caso extremo, podría tener un hemisferio negro y otro blanco; le correspondería, pues, hasta un 50 por ciento de las variaciones periódicas de luz. Plutón podría también experimentar variaciones estacionales en la reflectividad de su superficie a causa de la inclinación de su eje y de las grandes variaciones de su distancia al Sol.

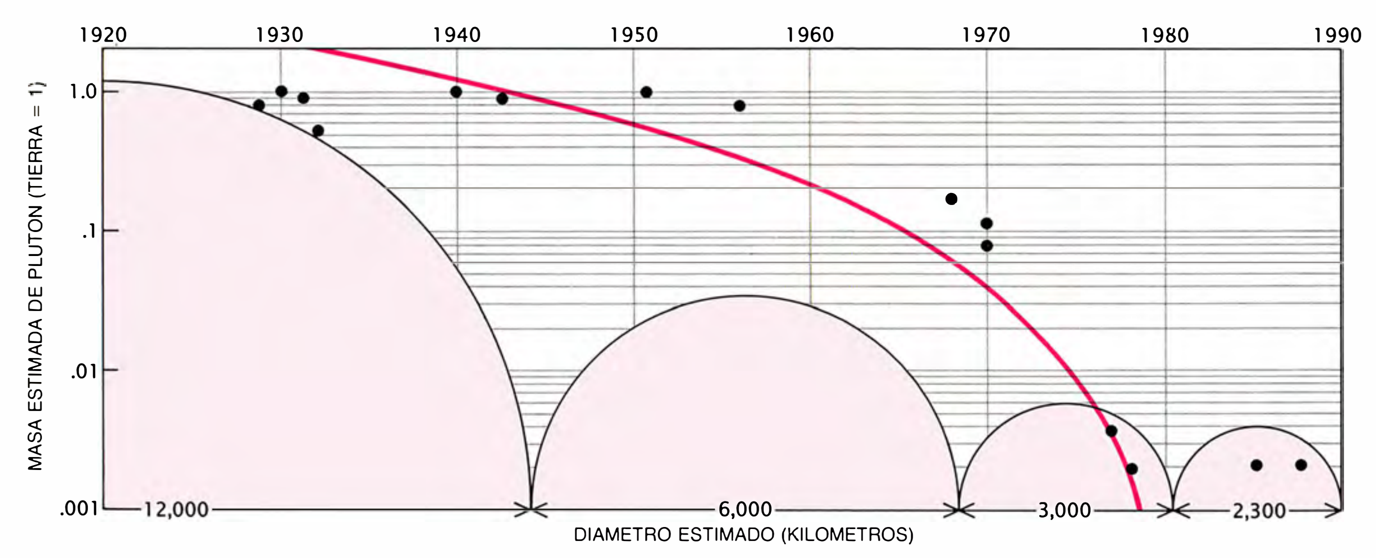
El desconocimiento de la inclinación de la órbita de Caronte y los diámetros relativos de Plutón y su satélite dificultaron la predicción del momento en que se producirían los primeros eclipses. Además, la luz del Sol y de la Luna o las nubes podrían entorpecer las observaciones. Cuantos se aprestaron a detectar los primeros eclipses no consignaron ninguno durante 1982, 1983 y 1984. Hasta que, en la fría y clara mañana del 17 de febrero de 1985, la vigilancia dio sus frutos cuando mis mediciones fotométricas con el telescopio de 91 centímetros del Observatorio McDonald registraron el debilitamiento de Plutón, en un 3 por ciento, a lo largo de dos horas; era ello signo claro del tránsito parcial de Caronte por delante de Plutón. El brillo de las estrellas de referencia próximas permaneció constante dentro de un margen del 0,5 por cien, lo que demostraba que el debilitamiento no había sido causado por bruma o nubes terrestres.

El calendario del suceso corroboraba una frustrada observación de eclipse realizada el 16 de enero de 1985 por Tedesco y Bonnie J. Buratti, del Laboratorio de Propulsión a Chorro. No informaron de sus resultados porque recelaron de sus mediciones por culpa de un fallo de la instrumentación. El 20 de febrero, Tholen confirmó que los eclipses Plutón-Caronte habían comenzado, cuando, sirviéndose del telescopio de 2,2 metros de la Universidad de Hawai en Mauna Kea, midió un debilitamiento luminoso del 2 por ciento mientras Caronte pasaba por detrás de Plutón, en el otro lado de su órbita.

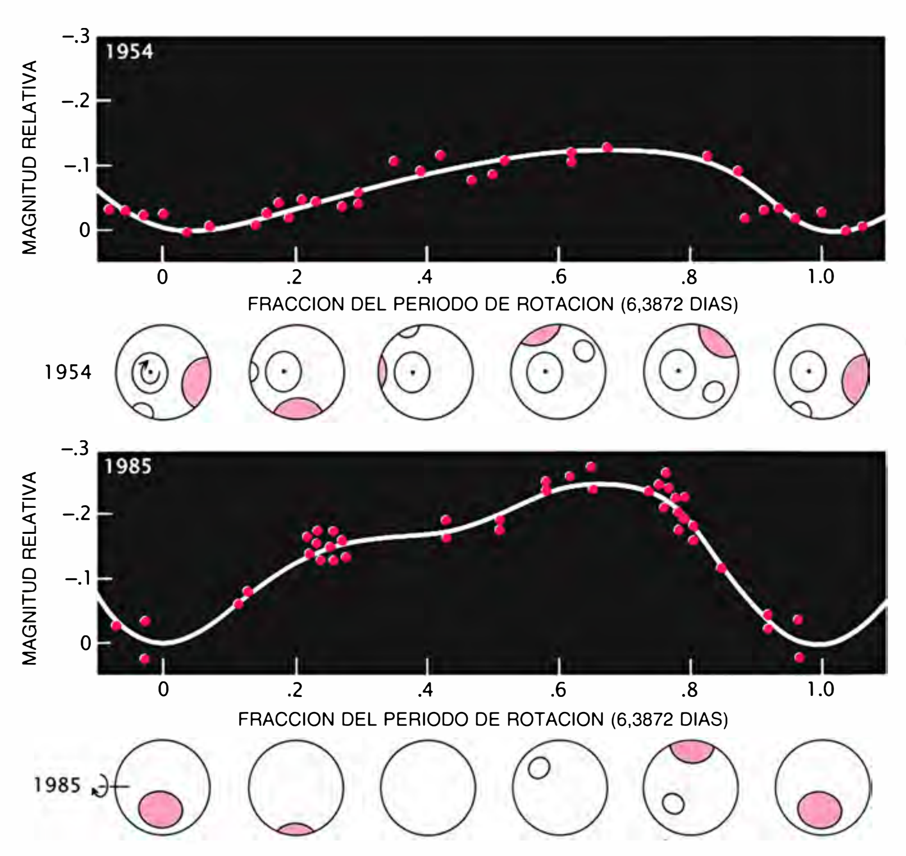
Las variaciones posicionales del Sol, la Tierra y Plutón provocan que el panorama de los tránsitos y ocultaciones cambie de continuo [*véase la figura 5*]. Si los eclipses se vieran desde el Sol, las posiciones relativas de Caronte y su sombra, durante los sucesivos tránsitos, seguirían una progresión sencilla y constante de derecha a izquierda. La Tierra, sin embargo, oscila de un lado al otro del Sol en el transcurso de seis meses. Ello produce un ciclo en las orientaciones aparentes de Plutón y Caronte: las posiciones relativas de sus discos son función de la visual Tierra-Plutón, mientras que las posiciones de sus sombras están determinadas por la visual Sol-Plutón.

En los primeros eclipses de 1985, Caronte pasó por delante del polo norte de Plutón y se ocultó tras el polo sur, pero sus discos apenas se superpusieron. Satélite y planeta se ocultaron más, uno a otro, durante 1986. Tránsitos y ocultaciones afectaban la misma zona superficial, si bien aquéllos originaron un oscurecimiento mayor. Evidentemente, un área dada de Plutón aporta más luz que la misma área de Caronte, lo que implica que el satélite se cubre, en su mayor parte, por materia más oscura que Plutón. En conjunto, el planeta refleja aproximadamente la mitad de la luz que incide sobre él; Caronte refleja menos de dos quintas partes.

Las ocultaciones completas de Caronte tras Plutón comenzaron en 1987; por primera vez se resolvieron los distintos espectros de los dos cuerpos. Cada elemento o compuesto absorbe la luz de una manera peculiar y característica; el espectro nos ofrece, pues, un método para inferir la composición del objeto. En las ocultaciones, Caronte desaparecía durante aproximadamente una hora; había



3. TAMAÑO Y MASA de Plutón. Los estimados en un comienzo, muy altos, resultaron ser erróneos, porque algunos astrónomos creían equivocadamente que la gravedad de Plutón perturbaba las órbitas de Urano y Neptuno. Con el tiempo se fueron produciendo revisiones a la baja, hasta el punto de que ciertos astrónomos anotaron con humor que una curva que se ajustase a las decrecientes estimaciones de la masa de Plutón señalaría la desaparición del planeta en 1980. Los análisis de la órbita de Caronte resolvieron la verdadera masa del sistema: 1/400 de la masa terrestre.



4. CAMBIO DE LUMINOSIDAD DE PLUTON conforme gira. En 1954, el polo sur del planeta apuntaba a la Tierra y, por tanto, quedaba siempre a la vista (*arriba*). Plutón se ha movido a lo largo de su órbita y ahora nos muestra un lado. La totalidad de su región ecuatorial entra y sale del campo de visión al girar, lo que hace que su brillo varíe en un 30 por ciento (*abajo*). El planeta ha perdido brillo, lo que constituye una señal de que la región ecuatorial es más oscura que el polo sur.

llegado el momento de realizar las mediciones espectroscópicas de Plutón solo. Al restar el espectro de Plutón del espectro conjunto (obtenido antes o después de la ocultación) se deducía el espectro de Caronte.

El espectro de Plutón revela una profunda hendidura a longitudes de onda del infrarrojo, alrededor de 0,9 micrometros (por encima mismo de las longitudes de luz roja visible); débese a la absorción de la radiación infrarroja por la escarcha de metano (CH_4) en la superficie del planeta. Los primeros en descubrirlo fueron, en 1976, Dale P. Cruikshank, David D. Morrison y Carl B. Pilcher, de la Universidad de Hawai.

El espectro de Caronte, por el contrario, no muestra picos ni hendiduras importantes a longitudes de onda inferiores a un micrometro. Ante nuestros ojos desnudos, Caronte ofrecería un aspecto gris suave y neutro, y Plutón sería rojizo. Las mediciones del espectro de Caronte a longitudes de onda mayores en el infrarrojo indican que el satélite está cubierto de hielo de agua. Esta diferente composición explica, probablemente, por qué Plutón es más reflector que Caronte.

¿Cómo pueden dos cuerpos que guardan tan estrecha relación diferir tanto en la superficie? La gravedad de Caronte es tan débil, cabe pensarlo, que no pudo retener el metano vaporizado por el calor del distante Sol. El metano fue barrido de la superficie del satélite, dejando al descubierto una capa subyacente de agua helada, más densa. Mientras tanto, Plutón, de mayor gravedad, retuvo su capa exterior de metano congelado. Los astrónomos creen que ambos cuerpos poseen composiciones internas similares y presumen que quizás haya en Plutón una capa de agua helada bajo la superficie de metano.

Gracias a las series de eclipses, se han conseguido, por último, mediciones precisas de los tamaños de Plutón y Caronte. Se pueden transformar las cronologías minuciosas de tránsitos y ocultaciones en dimensiones de los objetos, a condición de que se conozca la distancia entre Caronte y Plutón. En la actualidad, el mejor método para hallar esta distancia es el de interferometría de motas, gracias a cuya técnica se obtienen mediciones de alta resolución empleando exposiciones brevísimas para congelar los efectos difuminantes de la atmósfera terrestre. Las observaciones de moteado realizadas por James Beletic y Richard Goody, de la Universidad de Harvard, combinadas con limitaciones impuestas por los tiempos registrados de los sucesos de eclipse, proporcionan una estimación de 19.640 kilómetros para el radio de la órbita de Caronte, con una precisión de alrededor del 2 por ciento.

El empeño más exigente de medida de los diámetros de Plutón y Caronte basándose en los tiempos de los eclipses lo ha llevado a cabo Tholen, y arroja una cifra de 2300 kilómetros para Plutón y 1186 kilómetros para Caronte; la incertidumbre viene a ser del 1 por ciento. Plutón es el menor de los planetas del sistema solar. Tiene aproximadamente la mitad del diámetro de Mercurio (que en tiempos se creyó que era el benjamín) y sólo dos tercios del diámetro de la Luna. El diámetro de Caronte, en torno a la mitad del de su planeta, le convierte en el mayor satélite del sistema solar en relación con el planeta alrededor del cual gira. Antes del descubrimiento de Caronte, ese hito correspondía a la Luna, cuyo diámetro es ligeramente superior a la cuarta parte del diámetro terrestre. Concedido que Plutón y Caronte tengan densidades semejantes, el centro de masa del sistema se encuentra a unos 1200 kilómetros por encima de la superficie de Plutón. En todos los restantes sistemas planeta-satélite conocidos, el centro de masa se halla en las profundidades interiores del planeta. Esa es la razón de que algunos vean en Plutón y Caronte un planeta doble.

Conocidos los diámetros de Plutón y Caronte y su masa conjunta, podemos calcular su densidad media. La detección de metano en el espectro de Plutón en el decenio de 1970 indujo en los astrónomos la sospecha de que Plutón estaba constituido por metano congelado, agua y otros compuestos ligeros, habituales, así se cree, en los dominios más externos de la nebulosa a partir de la cual se formó el sistema solar. Esto sugería que la densidad de Plutón debía ser baja, sin superar, quizá, la del agua (un gramo por centímetro cúbico).

Cálculos recientes cifran en algo más de dos gramos por centímetro cúbico la densidad real de Plutón. Significa ello que el planeta contiene una cantidad apreciable de materia rocosa, además de hielos. Las mediciones de la velocidad orbital y el radio orbital de Caronte proporcionan solamente la masa total del sistema, de

manera que la densidad calculada representa un promedio de las densidades de Plutón y Caronte. Desde su ubicación, por encima de la atmósfera terrestre, el Telescopio Espacial Hubble podrá establecer con precisión el radio orbital y el centro de masas del sistema. Con ello quedarían determinadas las masas relativas y las densidades de los dos objetos, así como cualquier diferencia radical en su composición interna.

Aun cuando los eclipses han aportado nuevos puntos de vista sobre la naturaleza de la superficie e interior de Plutón y Caronte, nada dicen acerca de la posible existencia de una tenue atmósfera que ciña al planeta. La presencia de tal atmósfera ha sido objeto de acalorados debates en los últimos diez años. La señal característica de metano, observada en el espectro de Plutón en 1976, se atribuyó en un principio al metano congelado en su superficie. En 1980, Uwe Fink, de la Universidad de Arizona, realizó mediciones espectrales más finas y llegó a la conclusión de que había metano en forma gaseosa. La falta de buenos espectros de laboratorio a las temperaturas y presiones que se encuentran en Plutón impidió que los astrónomos distinguieran con nitidez la presencia de hielo y la de gas a partir de las observaciones telescópicas. Para la mayoría de los investigadores, en Plutón se daban ambas formas.

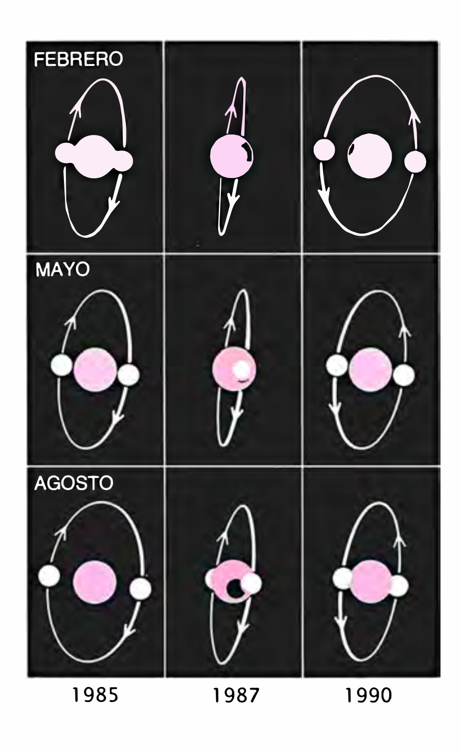
Afortunadamente, la naturaleza ofrece un método para detectar y medir una atmósfera sin ambigüedad: una ocultación estelar. Cuando un planeta u otro objeto pasa por delante de una estrella, la atmósfera –si la hubiere– distorsiona y atenúa la luz de la estrella de una manera característica. Durante tres decenios, los astrónomos habían tratado de identificar estrellas que se hallaran directamente en la órbita de Plutón vista desde la Tierra; Plutón se resistía a ocultar directamente ninguna estrella de brillo razonable. Un breve destello observado cuando una estrella pasó cerca de él en 1980 lo produjo, al parecer, Caronte. Una posible ocultación en 1985 quedó desechada por malas condiciones de observación. La posición exacta de Plutón relativa a las estrellas ha resultado difícil de predecir a causa del bamboleo producido en su movimiento por la atracción gravitatoria de Caronte. El incierto diámetro de Plutón ha confundido también a los astrónomos que trataban de predecir ocultaciones.

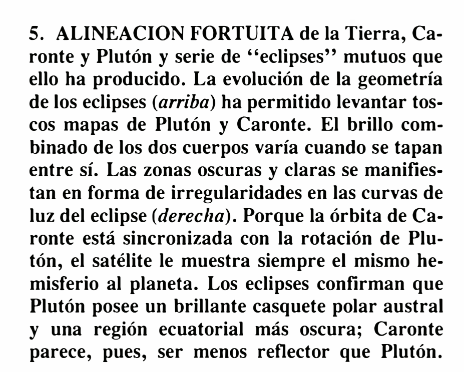
En 1985, Douglas J. Mink, de la Universidad de Harvard, y Arnold R. Klemola, del Observatorio Lick, identificaron una estrella de duodécima magnitud en la constelación de Virgo, que parecía encontrarse exactamente en la trayectoria de Plutón; predijeron que se produciría una ocultación el 9 de junio de 1988. Cálculos adicionales que llevó a cabo Lawrence H. Wasserman, del Observatorio Lowell, señalaban que la sombra de Plutón barrería algunas partes de Australia, Nueva Zelanda y el Pacífico Sur.

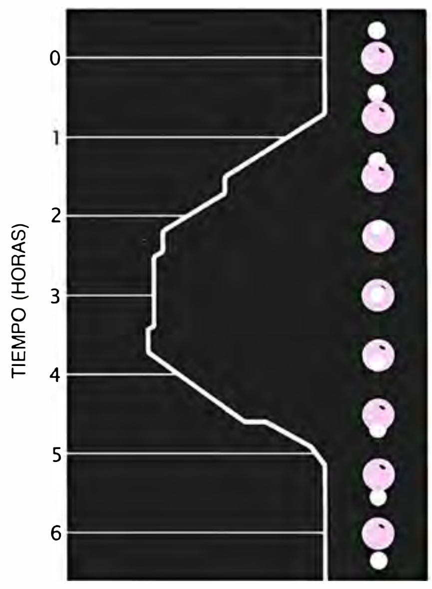
Dos grupos de astrónomos, dirigidos por Robert L. Millis, del Observatorio Lowell, y James L. Elliot y Edward W. Dunham, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, organizaron expediciones para registrar la ocultación, en coordinación con observatorios de Australia, Nueva Zelanda y Tasmania. Los observadores de ocho lugares diferentes remataron con éxito su trabajo.

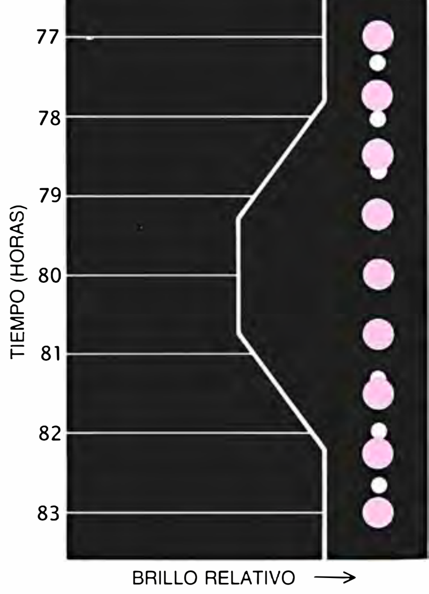
La estrella no desapareció bruscamente en su paso por detrás del disco de Plutón, sino que se fue debilitando poco a poco. Tal comportamiento es característico de la luz estelar absorbida y refractada al atravesar capas de espesor creciente de una atmósfera. La curva de luz mostraba un descenso gradual y uniforme a medida que se adentraba en las capas altas de la atmósfera de Plutón. Cuando la imagen de la estrella atravesaba los niveles más bajos de la atmósfera, la curva de luz descendió de golpe.

Plutón parece poseer una atmósfera superior transparente, superpuesta a una capa inferior más opaca; la frontera entre ambas parece, también, muy abrupta. Se han propuesto dos hipótesis para describir la estructura. A tenor de la primera, la at-





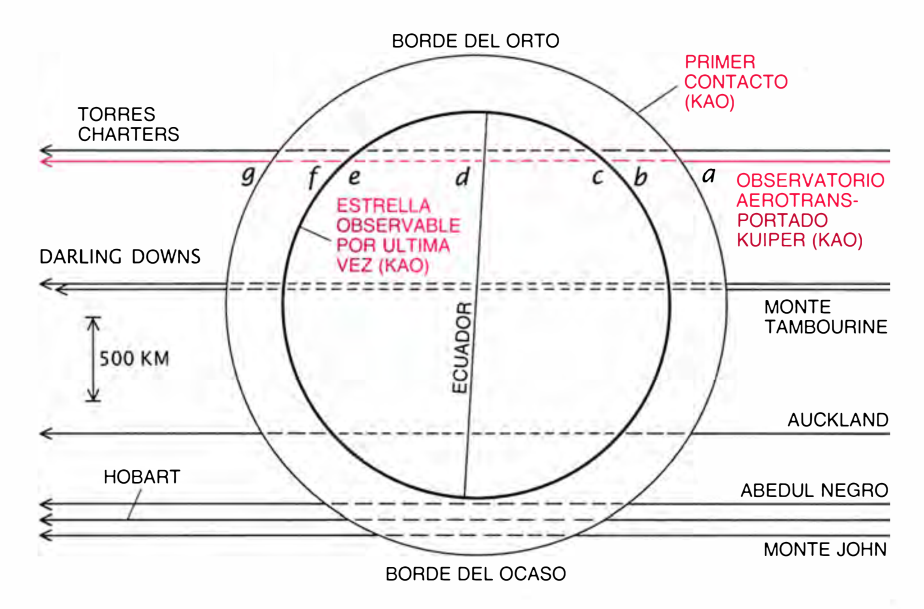


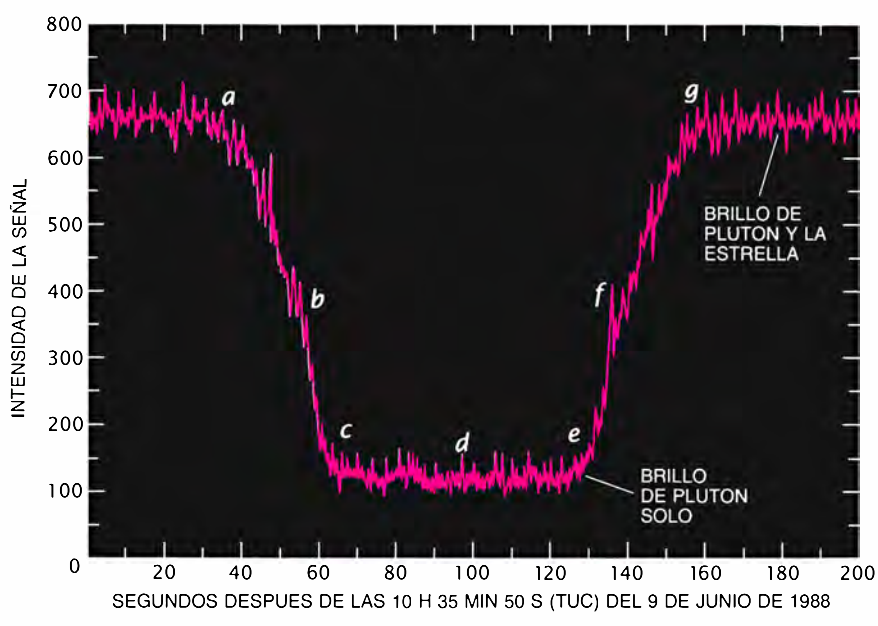


5. ALINEACION FORTUITA de la Tierra, Caronte y Plutón y serie de "eclipses" mutuos que ello ha producido. La evolución de la geometría de los eclipses (*arriba*) ha permitido levantar toscos mapas de Plutón y Caronte. El brillo combinado de los dos cuerpos varía cuando se tapan entre sí. Las zonas oscuras y claras se manifiestan en forma de irregularidades en las curvas de luz del eclipse (*derecha*). Porque la órbita de Caronte está sincronizada con la rotación de Plutón, el satélite le muestra siempre el mismo hemisferio al planeta. Los eclipses confirman que Plutón posee un brillante casquete polar austral y una región ecuatorial más oscura; Caronte parece, pues, ser menos reflector que Plutón.

mósfera de Plutón tiene una temperatura casi uniforme, si bien la luz solar sublima los gases congelados en la superficie del planeta y crea una bruma a baja altura. De acuerdo con la segunda, la brusca atenuación resulta de un cambio importante de temperatura entre las dos capas de la atmósfera. El aire caliente y el frío refractan la luz en diferente cuantía, efecto que causa el centelleo de las estrellas vistas desde la Tierra.

Los modelos desarrollados por grupos del MIT y de la Universidad de Arizona no han podido determinar todavía cuál de las dos explicaciones es la más plausible. Ello no obsta para que las propiedades básicas de la atmósfera del planeta se conozcan ahora bastante bien. Delgadísima, su presión atmosférica en la superficie no alcanza allí la cienmilésima parte de la terrestre. Además del metano, la atmósfera podría contener gases más pesados: argón, nitrógeno (N_2), monóxido de carbono (CO) y oxígeno (O_2). Porque el nitrógeno es el componente principal de la delgada atmósfera de Tritón, muchos astrónomos creen que podría también constituir buena parte de la atmósfera de Plutón.





6. GRACIAS AL CENTELLEO DE LAS ESTRELLAS se demostró que Plutón tiene atmósfera. Los astrónomos observaron desde ocho puntos distintos el paso de ese planeta frente a una estrella distante el 9 de junio de 1988 (*arriba*). La estrella se fue debilitando conforme su luz atravesaba la atmósfera. Un brusco descenso en la curva de luz (*b* y *f*), observado desde el *Observatorio Aerotransportado Kuiper*, indica una capa de transición en la atmósfera de Plutón (*abajo*); podría tratarse de una bruma baja o una región atmosférica de rápido cambio térmico. (Esquemas de Gabor Kiss.)

Necesitamos conocer la temperatura en la superficie de Plutón si queremos saber qué gases de su atmósfera podrían depositarse en forma sólida. Gracias a los datos recogidos por el Satélite Astronómico Infrarrojo, de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los EE.UU. (NASA), Mark V. Sikes, de la Universidad de Arizona, y sus colaboradores dedujeron que la temperatura superficial en la zona ecuatorial de Plutón era de unos 58 kelvin. Temperatura que es compatible con la presencia de metano en su atmósfera.

La existencia real de atmósfera podría aportar la respuesta a una cuestión suscitada en las observaciones de eclipses mutuos: ¿por qué brilla tanto la superficie de Plutón? En promedio, la reflectividad de ese planeta multiplica por siete la de la Luna. Dato ese que provoca sorpresa porque, en menos de un millón de años, la brillante superficie de hielo de metano debería haberse vuelto oscura y rojiza en virtud de las reacciones químicas causadas por la radiación ultravioleta del Sol y por los rayos cósmicos, partículas de alta energía. La superficie reflectora de Plutón requiere algún mecanismo que la renueve continuamente.

S. Alan Stern, de la Universidad de Colorado en Boulder, Laurence M. Trafton, de la Universidad de Texas en Austin, y Randall Gladstone, de la Universidad de California en Berkeley, han propuesto, en un trabajo conjunto, un mecanismo de esos. La distancia de Plutón al Sol varía muchísimo —de 4500 a 7400 millones de kilómetros— como resultado de la gran excentricidad de su órbita, produciendo, a su vez, variaciones extremas de temperatura. Según sea su composición global, la atmósfera de Plutón podría constituir un fenómeno temporal que se diera sólo cuando el planeta se hallara en su máxima cercanía al Sol.

Plutón alcanzó el perihelio en 1989. Al alejarse, se enfriará. Dentro de unos 20 o 40 años, la atmósfera de metano podría condensarse sobre la superficie, cubriendo el planeta con una nueva capa de nieve de metano. Esta manta persistirá sobre la superficie hasta que se acerque de nuevo al Sol.

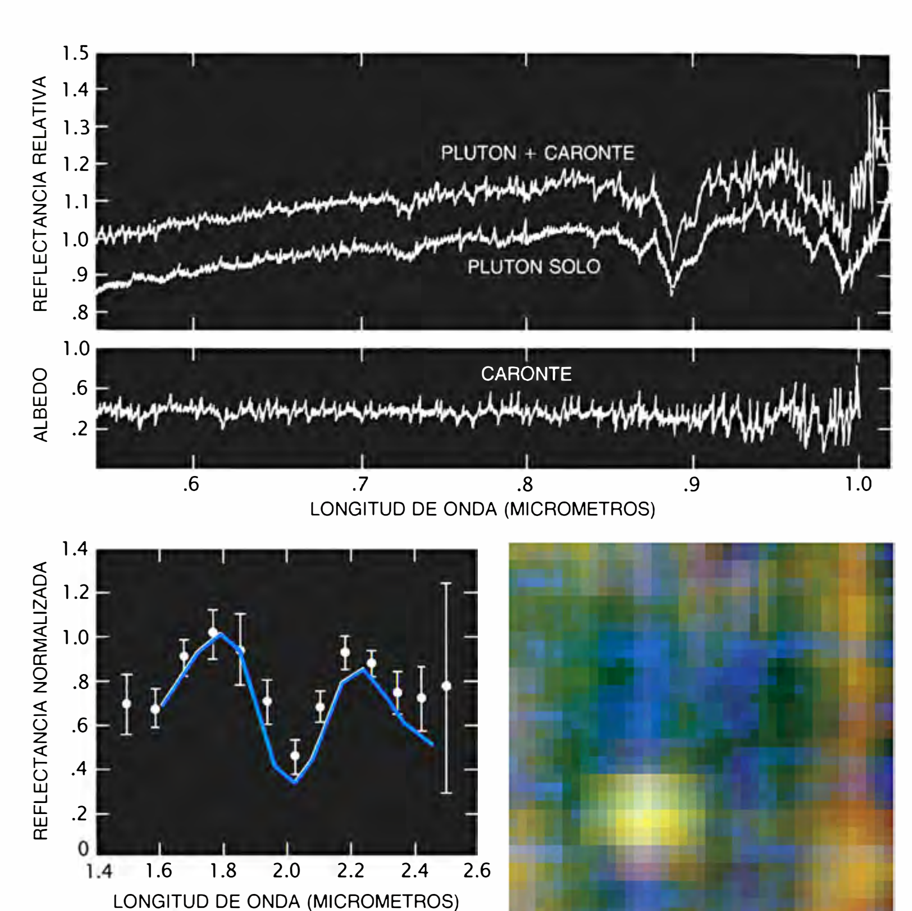
Los eclipses Plutón-Caronte y la ocultación estelar nos han revelado tantos pormenores desconocidos de las características físicas de Plutón, que ya podemos abordar la cuestión de la formación del planeta. Su densidad es mayor que la de los planetas exteriores gaseosos y la mayoría de

sus helados satélites. Debido a ello, algunos investigadores se plantearon —sobre todo, años atrás, cuando la densidad de Plutón se creía todavía mayor— si quizá no se habría formado en algún otro lugar, tal vez en la vecindad de la Tierra o de otros cuerpos densos del sistema solar interior.

Los cálculos del movimiento orbital de Plutón, relativos a un intervalo de 845 millones de años y que debemos a Gerald J. Sussman y Jack L. Wisdom, del MIT, abonan la idea de una órbita caótica durante largos períodos. Plutón podría, en efecto, haber nacido en otro lugar y haberse independizado hasta su actual órbita. Esos investigadores, no obstante, consideran más probable que Plutón se formara en el sistema solar exterior y que el comportamiento caótico le condujera a su órbita actual tan excéntrica.

Las teorías en vigor mantienen que el sistema solar se condensó a partir de una nebulosa colapsada de gas y polvo. Varios estudios recientes sugieren que, en los bordes exteriores de esta nebulosa, pudieron crearse cuerpos bastante densos. A las bajas temperaturas y presiones de esas regiones, la mayor parte del carbono se combina con oxígeno para formar monóxido de carbono; sólo una pequeña fracción del carbono acaba produciendo metano. El oxígeno abunda más que el carbono. El oxígeno sobrante se puede combinar con silicio (dando, por ejemplo, SiO_4, la arena común) y otros metales para crear materias rocosas. El agua helada (H_2O) se produce cuando el oxígeno se combina químicamente con átomos de hidrógeno. Los estudios predicen que las concentraciones de la materia rocosa y el hielo serían de 75 y 25 por ciento respectivamente. El monóxido de carbono gaseoso, arrastrado por fuertes vientos procedentes del recién nacido Sol, dejaría tras de sí la materia densa.

Reflexionando sobre esta posibilidad, William B. McKinnon, de la Universidad de Washington, Steven W. Mueller, de la Universidad Metodista del Sur, y Damon P. Simonelli, del Centro de Investigación Ames de la NASA, elaboraron modelos detallados de la formación de Plutón y de su composición interna. La densidad observada encajaría limpiamente si el planeta estuviera formado por un 68 a 80 por ciento de roca y el resto fuera una mezcla de hielos. Eso convertiría a Plutón en un cuerpo más rocoso que los satélites de Saturno y Urano. Estos cuerpos formaron cuasi-protoplanetas en los que las temperaturas y presiones relativamente



7. ESPECTROS DE PLUTON Y CARONTE: suelen aparecer mezclados. Cuando Plutón oculta a Caronte, se recibe sólo la luz del planeta. Las hendiduras en el espectro de Plutón se deben al metano. Restando el de Plutón del espectro conjunto, aparece el espectro aplanado de Caronte (*arriba*). Caronte no tiene metano; su espectro a mayores longitudes de onda (*abajo a la izquierda*) se parece al del agua helada (*curva azul*). Plutón y Caronte fueron observados por el *Satélite Astronómico Infrarojo* (*abajo a la derecha*). El azul y el rojo representan medidas correspondientes a zonas calientes y frías, respectivamente; las mediciones son compatibles con superficies heladas y tenue atmósfera.

altas destruyeron el monóxido de carbono. En esas regiones, no se obstaculizó la formación de metano y agua helada, motivo por el cual tales satélites poseen altas proporciones de los materiales ligeros citados. Las bajas densidades típicas de los planetas exteriores eliminan la vieja hipótesis de que Plutón fuera un satélite escapado de Neptuno.

Desde hace tiempo, los astrónomos planetarios sospecharon posibles semejanzas entre Plutón y Tritón, el gran satélite de Neptuno. Antes del encuentro del *Voyager 2* con Neptuno el año pasado, los astrónomos conocían mejor Plutón que el satélite, pero ahora la situación se ha invertido. El diámetro de Tritón (2700 kilómetros), su densidad (2,08 gramos por centímetro cúbico) y espesor atmosférico guardan un estrecho parecido con los de Plutón. La densidad similar sugiere un mismo origen: como cuerpos independientes en las frías regiones exteriores de la nebulosa protoplanetaria dominada por el monóxido de carbono.

Tritón probablemente fue capturado poco después de su formación y acabó en su peculiar órbita (retrógrada) alrededor de Neptuno. Plutón, que evitó una captura igual, tampoco fue expulsado del sistema solar. Se instaló, por el contrario, en una resonancia 3:2 estable con respecto a Neptuno, de modo que éste completa tres órbitas en el tiempo en que Plutón recorre dos. Por eso mismo, Plutón nunca se acerca a menos de 2700 millones de kilómetros de Neptuno y ha podido evitar un encuentro cercano que lo destruyera.

La captura de Tritón por Neptuno encaminó su evolución por derroteros diferentes. Las tensiones gravitatorias y las mareas que Tritón sufrió debieron calentar su interior. A ese calentamiento pueden deberse las misteriosas y complicadas estructuras que vemos en la superficie del satélite. Plutón puede haber sufrido también un apreciable calentamiento interno

propio, en virtud de sus interacciones con Caronte, aunque esto depende de cómo naciera su satélite.

Cuando Plutón se formó, su interior encerraba quizá calor suficiente para dejar que sus componentes se dispusieran por orden de densidades: la roca se habría hundido, creando un núcleo, el agua estaría en medio y el metano habría flotado hasta la parte superior formando la superficie de metano helado que vemos hoy día.

Si Plutón y Caronte se formaron juntos como planeta doble, tendrán entonces una composición interna similar y podrían constituir muestras casi inalteradas de la nebulosa a partir de la cual se condensó el sistema solar. Si Caronte se formó a raíz de un choque entre Plutón y otro objeto (verbigracia, un planetésimo menor), Plutón habría también experimentado un calentamiento interno tras la formación del satélite; la composición de los dos cuerpos sería, entonces, muy diferente. La hipótesis del choque es muy socorrida por los investigadores para explicar el origen de la Luna terrestre. La determinación de las densidades relativas de Plutón y Caronte ayudará a desentrañar el origen de este último.

Podría haber diferencias entre las superficies de Plutón y Tritón debido a la excéntrica órbita de Plutón y sus consiguientes variaciones estacionales. Plutón podría sufrir las interacciones superficie-atmósfera más importantes de todos los planetas. Por desgracia, no adquiriremos un conocimiento cabal de la superficie y de la dinámica de la atmósfera de Plutón hasta que no lo examine de cerca una sonda espacial. La visita a Plutón, que en principio estaba incluida en la ruta del "Grand Tour" de los años setenta (proyecto que cristalizó con el tiempo en las misiones Voyager), quedó descartada por los recortes presupuestarios y la idea equivocada de que Plutón "carecía de interés".

Los nuevos enfoques de la naturaleza compleja de Plutón han avivado el deseo de la comunidad científica de una misión espacial a ese mundo remoto. La trayectoria de la misión a Plutón implicaría un compromiso entre el tiempo de viaje y la duración del encuentro científicamente útil. Una trayectoria de alta velocidad representa un viaje a Plutón más rápido y aumenta las probabilidades de que el vehículo espacial funcione bien cuando llegue al planeta. Pero también significa que la nave pasaría raudamente junto a Plutón y dispondría de escaso tiempo para sacar imágenes de alta resolución. Una velocidad menor exige consolidar la fiabilidad a causa del mayor tiempo de viaje, pero permite un encuentro más relajado.

El anteproyecto de misión que ahora se halla en estudio trabaja con la idea de un par de vehículos bastante sencillos; cada uno transportaría un sistema de imágenes, un espectrómetro y un magnetómetro (para medir los campos magnéticos en la vecindad de Plutón). Cada sonda incluiría también uno o más detectores de partículas, que permanecerían activos durante toda la misión, enviando mediciones del viento solar y de la ingente burbuja de partículas que rodea el Sol. Las sondas saldrían por separado, usando la Tierra y Júpiter como impulsores gravitatorios, y llegarían a Plutón con un año de diferencia. Podrían lanzarse a principios del siglo próximo; tardarían unos 14 años en arribar al planeta. La larga fase de encuentro duraría varios meses, pero las mediciones detalladas que permite un encuentro próximo sólo se desarrollarían durante unas horas.

El envío de dos vehículos espaciales aumenta la probabilidad de que al menos uno tenga éxito; además, en razón de la economía de escala, el coste sería sólo ligeramente superior al de una sola sonda. Si uno y otro cumplieran su función, podrían investigarse fenómenos dependientes del tiempo en Plutón (por ejemplo, las variaciones de su atmósfera) y obtener imágenes de ambos hemisferios del planeta y de su satélite a alta resolución, lo que resulta imposible en un solo encuentro, debido a su lenta velocidad de rotación.

La misión a Plutón culminaría el esfuerzo empeñado en el reconocimiento de todos los cuerpos importantes del sistema solar. Conforme cada planeta ha ido revelando sus secretos, la hermosa y desconcertante diversidad de la naturaleza se ha ido abriendo ante nuestros ojos con mayor claridad. Quién sabe lo que nos espera cuando se consuma el asalto a Plutón.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

OUT OF THE DARKNESS: THE PLANET PLUTO. Clyde Tombaugh y Patrick Moore. Stackpole Books, 1980.

PLANETS BEYOND: DISCOVERING THE OUTER SOLAR SYSTEM. Mark Littmann. John Wiley & Sons, Inc., 1988.

WHERE IS PLANET X? Mark Littmann en *Sky & Telescope*, vol. 78, n.º 6, págs. 596-599; diciembre de 1989.

THE NEW SOLAR SYSTEM. Dirigido por J. Kelly Beatty et al. Tercera Edición. Cambridge University Press, 1990.

Biosonar y cómputo neural en los murciélagos

Merced a su sistema de señales de biosonar, los murciélagos obtienen abundante y minuciosa información sobre su entorno. Las neuronas de su sistema auditivo han adquirido un alto grado de especialización

Nobuo Suga

Está muy extendido el error de que las pulsaciones acústicas utilizadas por los murciélagos, en su vuelo y en la localización de sus presas, constituye un sistema tosco, algo así como avanzar en la obscuridad orientado por los golpes de una caña. Pero el biosonar ha demostrado ser cualquier cosa menos basto. Mediante la ecolocación, el murciélago sigue el recorrido y captura una escurridiza mariposa nocturna con una facilidad y un porcentaje de éxitos que envidiaría cualquier ingeniero aeronáutico militar.

Además de informar sobre la distancia del objetivo, el sonar de los murciélagos transmite algunos otros detalles de interés. De los corrimientos Doppler —cambios de la frecuencia del eco en relación con la señal original— no se infiere sólo la velocidad relativa de un insecto volador, sino también su batir de alas. La amplitud del eco, combinada con su demora, indican el tamaño del blanco. Las amplitudes de las frecuencias componentes corresponden al tamaño de distintos rasgos de las presas. Las diferencias entre ambas orejas, en la intensidad y tiempo de llegada del sonido, dan el azimut del objetivo; el modelo de interferencia de las ondas sonoras reflejadas en la estructura de los oídos externos señala la elevación.

NOBUO SUGA es profesor de biología en la Universidad de Washington en San Luis, desde 1976. De origen japonés, estudió en la Universidad Metropolitana de Tokio, donde se licenció en 1958 y se doctoró en biología en 1963. Ingresó luego en la Universidad de Harvard como adjunto de investigación, y allí se especializó en el sistema auditivo de los murciélagos con Donald R. Griffin.

Los complejos cómputos nerviosos necesarios para extraer tanta información se desarrollan en el interior de un cerebro del tamaño de una perla grande. Mis colegas y yo hemos dedicado 27 años a la exploración de los mecanismos nerviosos que subyacen en la capacidad de los murciélagos para la ecolocación. Las características bien definidas de su mundo auditivo lo convierten en animal ideal para aclarar los procesos de información que ocurren en su sistema auditivo. Mecanismos que sin duda comparten en buena medida otros animales.

Hay, en el mundo, unas 800 especies de murciélagos microquirópteros. Todas, cabe presumirlo, se sirven de la ecolocación. Ocupan distintos hábitats y varían notablemente en su conducta y rasgos físicos. Sus pulsaciones de biosonar también difieren, incluso entre especies del mismo género. Lo que no empece que podamos agrupar las pulsaciones en tres tipos: frecuencia constante (FC, o CF), modulada (FM) y combinada (FC-FM). Las pulsaciones FC consisten en una frecuencia única o tono. Las pulsaciones FM tienen un movimiento descendente y suenan como chirridos. La pulsación FC-FM consta de un tono largo y constante seguido por un movimiento descendente, *iiiiiu*. En muchos murciélagos, los tonos no son puros, sino que poseen uno fundamental, o primero, y varios armónicos más elevados (múltiplos de la frecuencia fundamental).

La mayoría de las especies emiten sólo un tipo de pulsación. El pequeño murciélago marrón, *Myotis lucifugus*, es un murciélago "FM"; emite pulsaciones FM que duran entre 0,5 y tres milisegundos con un movimiento descendente de aproximadamente una octava. El murciélago bigotudo, *Pteronotus parnellii*, es un "FC-FM"; emite largas pulsaciones FC que duran de cinco a 30 milisegundos, seguidas por un corto movimiento FM que dura entre dos y cuatro milisegundos. [Nota del traductor: Se ha conservado la traducción literal del nombre popular de la especie americana *Pteronotus parnellii* (dicha especie no habita en Europa). Sin embargo, no hay que confundirla con el murciélago bigotudo europeo (*Myotis mystacinus*).] Algunas especies cambian sus pulsaciones según cuál sea la situación. El murciélago pescador, *Noctilio leporinus*, por ejemplo, emite pulsaciones FC y FC-FM mientras vuela, pero emite pulsaciones FM cuando está cazando.

Una pulsación FC larga es excelente para detectar presas mayores que la longitud de onda de la señal, porque la energía del sonido reflejado se concentra en determinada frecuencia. También es ideal para medir los corrimientos Doppler. La FC no es apropiada, en cambio, para determinar un blanco con precisión o dibujar sus perfiles. Se necesita un gran número de frecuencias para obtener más información sobre los rasgos del objetivo. Los murciélagos dilatan su rango de frecuencias produciendo armónicos y emitiendo ráfagas de FM que se superponen en una amplia gama de frecuencias. Las pulsaciones FM también contienen más información acerca del tiempo y, por ello, se utilizan para computar la demora del eco y determinar, de ese modo, la distancia de un blanco.

Algunas especies controlan la ener-

1. VUELO RASANTE del murciélago bigotudo, dispuesto a abrevar en un estanque. El biosonar de esta especie ha sido objeto de investigación.

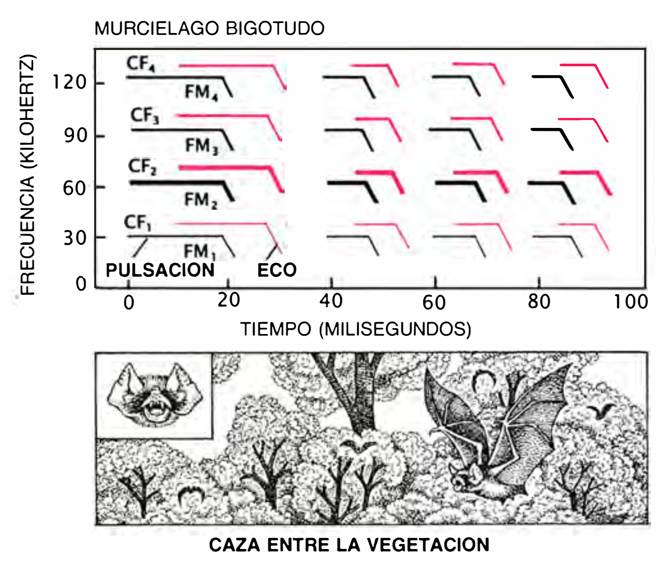
gía en cada armónico en razón de la distancia a la que se halle su objetivo. Si está lejos, amplifican los armónicos más bajos, que son los que menos se atenúan por el aire. Pero, si el objetivo está cercano, intensifican los armónicos de mayor frecuencia para obtener detalles más precisos de la posible presa. Cuando se abaten sobre ésta, los microquirópteros acortan la duración de sus pulsaciones e incrementan la tasa de emisión hasta 100 y 200 pulsaciones por segundo en murciélagos FC-FM y FM, respectivamente. Ajuste que no sólo responde a la necesidad de identificar la presa en sus menores detalles; débese también a lo siguiente: cuando la distancia entre el murciélago y su presa es pequeña, la posición angular de la víctima cambia antes y, entonces, él ha de emitir más señales para rastrear la presa con mayor precisión.

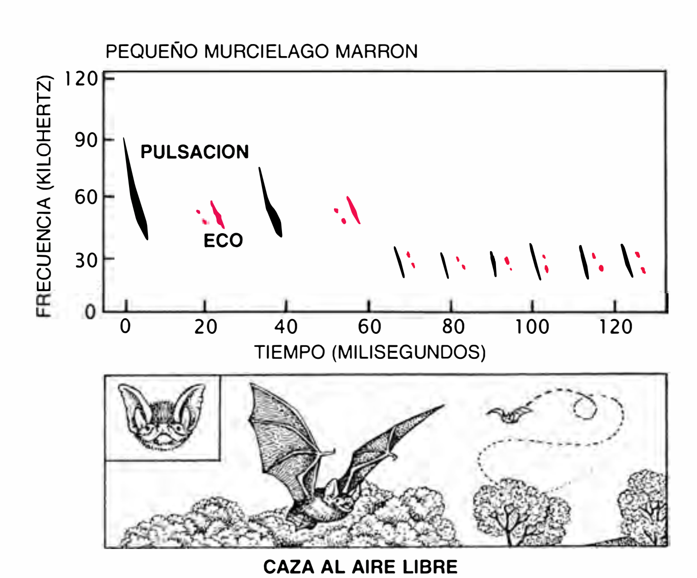
Las estrategias de caza y la conducta de una especie guardan relación directa con las características de su biosonar. Los principales elementos clave de su biosonar, por su parte, se reflejan en la organización funcional de su sistema auditivo. Desde que Donald R. Griffin y Robert Galambos descubrieran el biosonar de los murciélagos hace cuarenta años, los neuroetólogos han venido estudiando el sistema auditivo en diversas especies, sobre todo, en el pequeño murciélago marrón, en el murciélago bigotudo y en el murciélago de herradura, *Rhinolophus ferrumequinum*. Cada uno produce sus pulsaciones de biosonar distintivas.

La atención de los investigadores se ha concentrado en el mecanismo auditivo del murciélago bigotudo. El biosonar y el sistema auditivo periférico de este murciélago fueron descritos, respectivamente, en 1964 y 1972, por Alvin Novick y su equipo de la Universidad de Yale. En 1972, empecé mi trabajo sobre el sistema auditivo periférico del murciélago bigotudo con James A. Simmons, hoy en la Universidad de Brown, y sobre el sistema auditivo central con Philip H.S. Jen, quien se halla en la Universidad de Missouri en Columbia. Se sumaron luego Toshiki Manabe y Kazuro Kujirai, hoy en la Universidad Municipal de Yokohama, William E. O'Neill, quien está en la de Rochester, y una docena más; abordamos, como digo, el sistema central auditivo del murciélago y los mecanismos nerviosos del procesado de la información del biosonar. Insistiremos aquí en lo que hemos descubierto a propósito de esta especie.

El murciélago bigotudo es capaz de







2. PULSACIONES DE BIOSONAR del murciélago bigotudo. Cada pulsación consta de un componente de frecuencia larga y constante (CF), seguido por un componente de frecuencia corta y modulada (FM). Cada pulsación contiene cuatro armónicos (*subíndices*). Cuando se aproxima a su objetivo, el murciélago emite pulsaciones más breves a un ritmo más elevado, manteniendo idénticos tonos. El murciélago marrón emite chirridos en FM. Cuando se acerca al blanco, los emite más cortos y tenues, a un ritmo superior. Las especies emiten pulsaciones coherentes con su conducta.

detectar, mientras vuela, la velocidad relativa de los objetos gracias al efecto Doppler, que se produce entre la emisión de las señales acústicas y recepción de su eco. Cuando un murciélago se dirige hacia un objeto estático, las pulsaciones que chocan y son reflejadas por dicho obstáculo se comprimen, es decir, sufren un corrimiento Doppler. El eco recibido por el murciélago se halla, por consiguiente, uniformemente realzado en una frecuencia superior a la emitida. Cuando nuestro mamífero se dirige hacia un insecto volador, el batir de alas del insecto introduce cambios en la oscilación de frecuencia, que se superponen sobre la resultante del corrimiento Doppler, lo mismo que las microondulaciones superficiales se encabalgan sobre una ola del océano.

Algunos murciélagos, como los bigotudos y los de herradura, pueden detectar el murmullo de las alas de un insecto de entre los ecos asociados con objetos estáticos (paredes o vegetación, por ejemplo). ¿Cómo lo consiguen? Parte de la respuesta radica en la llamada compensación del efecto Doppler, estratagema identificada por Hans-Ulrich Schnitzler, de la Universidad de Tübingen. Un murciélago bigotudo en reposo emite un tono fundamental de unos 30,5 kilohertz y tres armónicos más elevados; la frecuencia de "descanso" del segundo armónico (FC_2) es de unos 61 kilohertz. Si el murciélago detecta un eco desplazado por corrimiento Doppler a 63 kilohertz, procedente de un objeto estacionario, reduce la frecuencia de los impulsos emitidos en 1,8 kilohertz; los ecos subsiguientes se estabilizan, pues, en una frecuencia de "referencia" de unos 61,2 kilohertz.

Estos murciélagos se han convertido en especialistas en analizar diminutas variaciones frecuenciales próximas a la frecuencia de referencia. Así, pues, la compensación del efecto Doppler introduce el eco FC_2 en la gama en la que el murciélago detecta mejor el batir de alas de los insectos.

Tal especialización empieza en el oído. Particular interés reviste el oído interno, o cóclea; posee ésta la membrana basilar, una hoja fina, alargada y arrollada en caracol. Cuando las ondas sonoras hacen vibrar el tímpano, la vibración, conducida hacia la membrana basilar, estimula unas células capilares, muy leves, que tapizan la membrana. La excitación se transmite, a través de las células ganglionarias espirales, por las fibras del nervio auditivo hasta el cerebro.

La señal nerviosa producida en la cóclea ha de contener toda la información vital para el murciélago. Las propiedades físicas de una señal acústica —amplitud, tiempo y frecuencia— deben, a su vez, traducirse en actividad nerviosa. La amplitud se expresa en la tasa o velocidad de descarga de impulsos por las fibras del nervio auditivo: cuanto mayor sea la amplitud, mayor será la tasa de descarga. La duración de las señales y el intervalo entre una y otra encuentran remedo en el patrón de impulsos nerviosos. Por último, la frecuencia de la señal se expresa por su localización en la membrana basilar: las altas frecuencias hacen vibrar la porción más cercana al tímpano, mientras que las más bajas estimulan zonas más alejadas.

En la membrana basilar de los murciélagos bigotudos hallamos cierta zona de un espesor insólito. Grosor que tiene que ver con la extrema sensibilidad a las frecuencias de entre 61,0 y 61,5 kilohertz (la FC_2 de los ecos compensados del efecto Doppler), en tanto que se muestra insensible a las frecuencias de alrededor de 59,5 kilohertz (la FC_2 de las pulsaciones compensadas del efecto Doppler). En otras palabras, la membrana se estimula intensamente ante los ecos, aunque apenas si responde ante las vocalizaciones propias.

La selectividad frecuencial de las células del ganglio espiral es altísima para el rango de 61,0 a 61,5 kilohertz. Estas células sintonizan frecuencias únicas. Es decir, cada neurona posee su frecuencia "óptima" (la que evoca la mayor respuesta), que difiere levemente de la de sus vecinas. De hecho, estas neuronas sintonizan con tal finura sus mejores frecuencias que pueden detectar cambios ligerísimos, de sólo el 0,01 por ciento. Los insectos voladores pueden evocar fácilmente cambios de frecuencia en orden de magnitudes crecientes. La periferia auditiva está, también, altamente especializada para analizar cambios de frecuencia próximos a señales de FC_1 (30 kilohertz) y FC_3 (92 kilohertz).

En el murciélago bigotudo, la gran sensibilidad y fina sintonización de la periferia auditiva de la frecuencia FC_2 se combinan con la compensación del efecto Doppler para brindarle tres

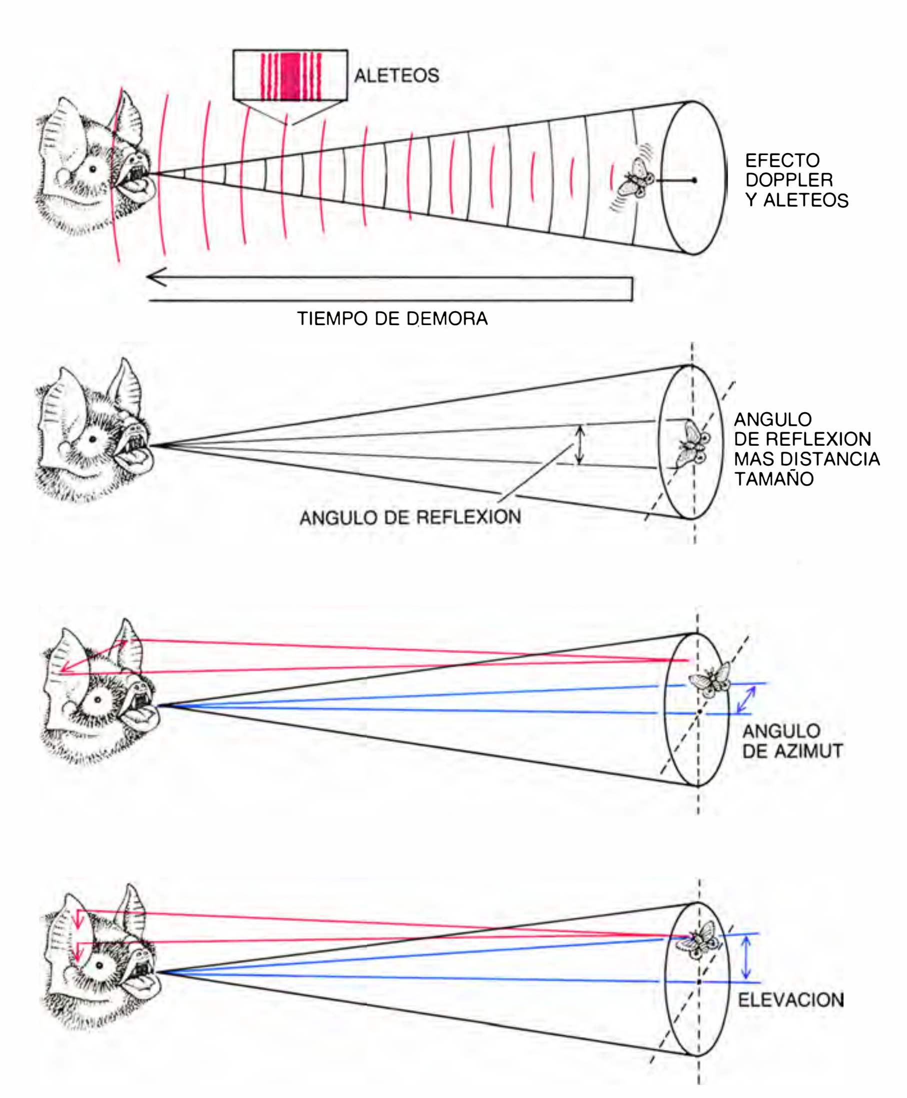
ventajas. En primer lugar, la periferia auditiva, exquisitamente sensible al eco de la FC_2 (cercano a 61 kilohertz), se muestra insensible a las pulsaciones emitidas por el murciélago en FC_2 (próximas a 59 kilohertz) durante la compensación del efecto Doppler; por tanto, las pulsaciones emitidas enmascaran apenas el eco. En segundo lugar, las neuronas, altamente especializadas en la sintonización, están capacitadas para captar la señal, aun cuando se halle sumergida en ruidos de fondo. Por último, la distribución de esas neuronas permite, de forma muy fiable, extraer el eco procedente del batir de alas de un insecto volador conforme ese eco sube y baja en la gama de frecuencias.

Contando con esas ventajas, el murciélago bigotudo no fallará en su captura de insectos, ni siquiera en medio de una frondosa vegetación. La compensación del efecto Doppler y la sintonización de frecuencias no se dan en los murciélagos de FM, así el pequeño murciélago marrón, que caza al aire libre.

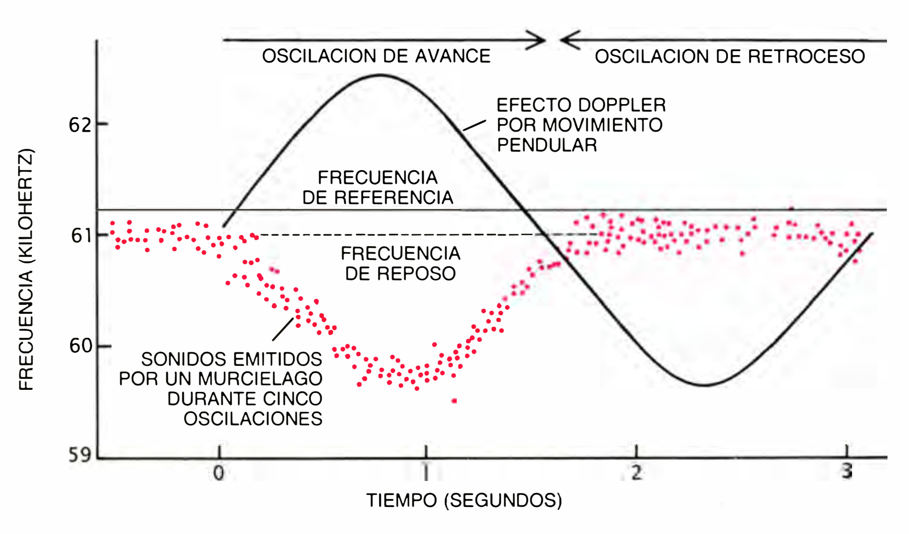
Una vez codificada la señal auditiva en señales nerviosas, habrá que proseguir analizándola para saber, por ejemplo, la velocidad o la distancia de la presa. Ese proceso se desarrolla en el sistema auditivo central. A partir de la cóclea, las señales se van analizando de forma secuencial; se empieza en el núcleo coclear y se continúa por el lemnisco lateral, el colículo inferior, el cuerpo geniculado medio y, finalmente, la corteza auditiva.

Con finos electrodos para registrar los impulsos nerviosos emitidos por cada una de las neuronas, investigué con mis colegas las respuestas de las neuronas del sistema auditivo de los murciélagos bigotudos cuando las señales de biosonar estimulaban el animal. ¿Qué descubrimos? Un sistema que había alcanzado un alto grado de desarrollo para procesar la información. Nos encontramos, en particular, con que las diferentes tareas de análisis se repartían entre varias áreas de la corteza auditiva anatómicamente distintas. Una región poseía neuronas que respondían sólo a ciertas frecuencias y amplitud de ecos. Una segunda región respondía únicamente a diferencias frecuenciales entre pulsaciones y ecos. Una tercera, por último, se manifestaba sensible al intervalo de tiempo transcurrido entre pulsaciones y ecos.

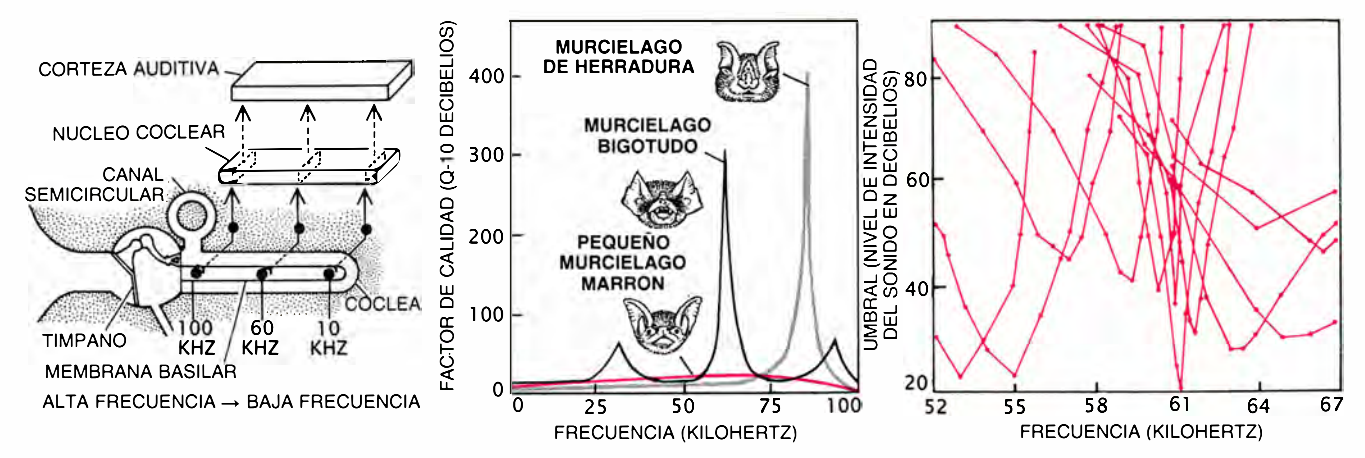
La mayor de las regiones especializadas de la corteza auditiva de los murciélagos bigotudos es, con mucho, la que procesa las señales de FC_2



3. DE LAS SEÑALES DE BIOSONAR puede extraerse copiosa información. La demora del eco y el corrimiento Doppler indican la distancia y la velocidad relativa de la presa. Las agitaciones rápidas delatan la presencia de insectos batiendo las alas. La amplitud del eco depende del tamaño relativo (ángulo subtendido) y de la distancia a que se halla el objetivo. El tiempo interaural y las diferencias de amplitud transmiten el azimut del blanco. Los modelos de interferencia de las ondas sonoras reflejadas en la estructura del oído externo señalan la altura. (Dibujos realizados por Patrica J. Wynne.)



4. COMPENSACION DEL CORRIMIENTO DOPPLER, demostrada colocando un murciélago bigotudo en un péndulo. Durante la oscilación de avance, disminuye la frecuencia de las pulsaciones emitidas por el animal (*puntos en color rojo*), de modo que el eco permanece en la frecuencia de "referencia". El animal no compensa el efecto Doppler durante la oscilación de retroceso. O'Dell W. Henson, Jr., adscrito a la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill, ideó el experimento.



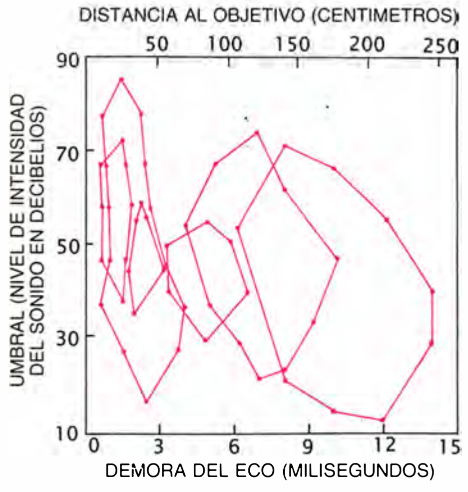
5. MEMBRANA BASILAR, puesta a vibrar, en la parte exterior, con altas frecuencias y, en la interior, con frecuencias menores. Las vibraciones excitan las células capilares que, a su vez, excitan las células del ganglio espiral. El gráfico central muestra la refinada selectividad, en el murciélago bigotudo, de las neuronas afinadas a los tres armónicos superiores FC, en particular a 61 kilohertz (FC_2), aunque también a 30 kilohertz (FC_1) y 92 kilohertz (FC_3). Selectividad refinada que volvemos a encontrar en las neuronas auditivas del murciélago de herradura, afinadas a 83 kilohertz, el armónico FC_2 de esta especie. El pequeño murciélago marrón produce únicamente una pulsación FM y, por dicha razón, carece de tales neuronas. El gráfico de la derecha pone de manifiesto las respuestas iniciales de 12 neuronas del murciélago bigotudo; para cada neurona el umbral cae a determinada frecuencia. La caída es muy pronunciada para neuronas que responden a frecuencias cercanas a unos 61 kilohertz, el armónico FC_2.

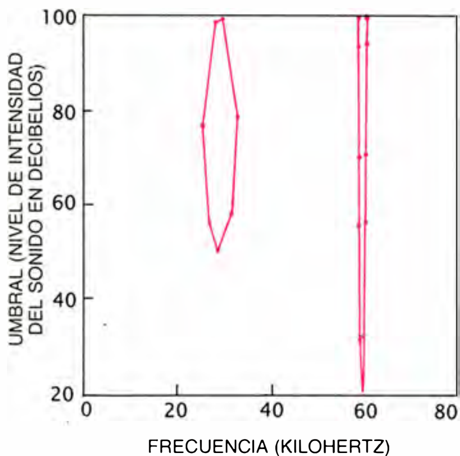
6. CARTOGRAFIA DE LA COMPUTACION de la corteza auditiva del murciélago bigotudo. Los mapas representan la demora del eco (la distancia) y el corrimiento Doppler (la velocidad relativa). En el área FM-FM (*verde*), las neuronas de cada línea negra responden ante una demora específica del eco. El gráfico superior (*derecha*) muestra las curvas de sintonía-demora de seis neuronas FM-FM; cada neurona se excita ante una demora y amplitud específicas del eco. En el área FC/FC (*marrón*), las neuronas de las líneas azules responden a una específica FC_1 combinada con FC_2 variables. Las neuronas de las líneas negras responden ante los efectos Doppler correspondientes a una específica velocidad relativa de la

del efecto Doppler. Esta región, llamada área FCSD, representa sólo un sector estrecho del rango de frecuencias, entre 60,6 y 62,3 kilohertz (cuando la frecuencia de reposo del murciélago es de 61,0 kilohertz). Con todo, ocupa un 30 por ciento de la corteza auditiva primaria. Las frecuencias exactas representadas difieren de un individuo a otro en función de sus frecuencias de reposo. En otras palabras, cada murciélago tiene su personal sistema auditivo.

Representaciones similares pueden hallarse en el cerebro, cuando la señal sometida a proceso resulta decisiva para la conducta de un animal. Por ejemplo, en gatos y monos, la corteza visual representa la fóvea, el área de la retina donde la agudeza visual es mayor. La corteza somatosensorial del primate representa la sensación táctil de los dedos.

Las neuronas del área FCSD sintonizan con extremada precisión determinadas frecuencias, mejor incluso que las neuronas de la periferia auditiva. También están afinadas para percibir la amplitud de una señal. Por tanto, cada neurona FCSD posee su frecuencia y amplitud particulares, ante las que responde mejor. Esta acuidad de las respuestas débese, tal parece, a la inhibición lateral, un mecanismo omnipresente en los sistemas sensoriales y mediante el cual las señales inhibidoras de las neuronas adyacentes intensifican la capacidad selectiva de una neurona ante determinados estímulos.





presa. El gráfico inferior (*derecha*) muestra las curvas de sintonía-frecuencia de una neurona FC_1/FC_2, que interviene con intensidad si la estimula una FC_1 de 29,38 kilohertz a 63 decibelios, combinada con una FC_2 de 60,52 a 45.

La corteza auditiva del murciélago bigotudo mide, en grosor, unos 900 micrometros, lo que corresponde a unas 40 o 50 neuronas. Cuando insertamos en la corteza un electrodo registrador, descubrimos que todas las neuronas perpendiculares a la superficie estaban sintonizadas a una frecuencia y amplitud idénticas. El área FCSD posee, pues, una "organización en columna". Organización que en 1959 Vernon B. Mountcastle, de la Universidad Johns Hopkins, había hallado en la corteza somatosensorial de los monos y, más tarde, David H. Hubel y Torsten N. Wiesel en la corteza visual de los gatos [véase "Mecanismos cerebrales de la visión", por David H. Hubel y Torsten N. Wiesel; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 1979].

Cuando insertamos un electrodo tangencialmente a la superfície cortical del área FCSD, observamos que la frecuencia y amplitud predilectas cambiaban de manera gradual; se nos reveló la existencia de una suerte de par de coordenadas cartesianas (frecuencia en función de amplitud) a lo largo de la superficie del área FCSD. Esa zona podríamos imaginárnosla como la rueda de una bicicleta: mientras se mueve hacia afuera a lo largo de un radio, se intensifica la frecuencia óptima de las neuronas; al movernos circularmente de un radio a otro, cambia la amplitud óptima.

¿Qué función cumple el área FCSD? Las neuronas de esa zona responden sin más a la amplitud y frecuencia del eco FC_2, al margen de la frecuencia del pulso emitido. Las neuronas FCSD guardan así una verosímil relación con la perspicacia en la discriminación de frecuencia y amplitud, lo mismo que con la detección de cambios en la frecuencia y amplitud que pueden producir insectos voladores.

Según recientes experimentos de Stephen J. Gaioni, Hiroshi Rikimaru y yo mismo, si destruimos la región FCSD, el murciélago pierde su capacidad discriminadora entre pequeñas diferencias de frecuencia; sólo sabrá distinguir las grandes. Tardará doble tiempo en realizar la compensación del efecto Doppler y cumplirá esa tarea con un rendimiento menguado en la mitad. Por todo ello suponemos que el área FCSD es la responsable de la precisión en la compensación del efecto Doppler, mas no compete a ella acometer la compensación propiamente dicha. Ignoramos la forma de conexión entre el área FCSD y las demás regiones responsables de ejecutar la compensación del efecto Doppler.

Sí conocemos bien otra importante función: la que le permite percibir la velocidad relativa de un objeto. Para ello, su cerebro calcula el efecto Doppler entre la pulsación emitida y el eco. En otras palabras, debe haber neuronas que "examinen" la relación de frecuencias entre ambos sonidos.

Hemos hallado tales neuronas en una parte de la corteza auditiva que denominamos área FC/FC. Se presentan en dos tipos: FC_1/FC_2 y FC_1/FC_3, cada uno de los cuales forma una región distinta. Se trata de neuronas sensibles a la relación de frecuencias entre los armónicos de la frecuencia constante. Las neuronas FC_1/FC_2 y FC_1/FC_3, en concreto, responden cuando un tono de entre 28 y 30 kilohertz (FC_1) está acoplado con un tono de alrededor de 61 kilohertz (FC_2) o 92 kilohertz (FC_3), respectivamente. (Las frecuencias FC_2 y FC_3 no son exactamente el doble y el triple que la FC_1, sino algo mayores para poder explicar el efecto Doppler en el eco.)

Cuando la pulsación, el eco, o el sonido de los tonos de FC o FM se emiten solos, esas neuronas responden muy débilmente. Pero lo hacen con destacada intensidad cuando se combinan pulsación y eco; se muestran entonces sensibles a las señales —en pares, aunque sean 6300 veces más débiles que las menores señales solitarias que puedan provocar una respuesta.

La organización funcional del área FC/FC abona nuestra conclusión de que estas neuronas se dedican, ante todo, a procesar la información relativa a la velocidad. Cada columna de neuronas responde mejor a una combinación particular de dos frecuencias; por ejemplo, 29,60 y 61,20 kilohertz. Las neuronas de un lugar sólo ligeramente distinto responden ante una combinación diferente; por ejemplo, a 30,05 y 61,10 kilohertz.

Las mediciones ulteriores mostra-

ron que la mejor combinación de frecuencias variaba de una forma regular a lo largo de la superficie cortical. La frecuencia preferente FC_1 crece en la longitud de un eje; las frecuencias FC_2 y FC_3 aumentaban en el eje perpendicular al mismo. En otras palabras, la región FC/FC se halla organizada por un sistema de coordenadas cartesianas, de frecuencia en función de frecuencia, sistema en el cual una localización específica representa una determinada velocidad relativa del objetivo.

Son los armónicos múltiplos enteros del tono fundamental, FC_1; por consiguiente, la comparación entre la pulsación FC_1 y el eco FC_2 o FC_3 habrá de darnos el corrimiento Doppler experimentado. En ese contexto, una determinada neurona podría responder en caso exclusivo de que concurrieran una pulsación FC_1 de 30 kilohertz y un eco FC_2 de 61 kilohertz; por ser, la frecuencia de la pulsación FC_2, doble de la frecuencia de la pulsación FC_1, esto es, de 60 kilohertz, el corrimiento Doppler en el eco será de un kilohertz. Corrimiento que se produciría si el objetivo se moviera a una velocidad relativa de 2,8 metros por segundo.

Hemos establecido la existencia de un eje en el seno de las regiones FC_1/FC_2 y FC_1/FC_3, que representa las velocidades entre menos dos y más nueve metros por segundo. Y lo que es más, un número elevado de neuronas representan velocidades de cero a cuatro metros por segundo. Estas velocidades se desarrollan durante actividades críticas para el animal: cuando el murciélago se prepara para posarse en su percha o captura a un insecto.

Acotada el área FC/FC, queríamos averiguar en qué punto del recorrido auditivo se incoaba el proceso de comparación de frecuencias. Sabíamos, de entrada, su ausencia en el sistema auditivo periférico; debía darse, pues, en alguna parte del sistema auditivo central. Basándose en las mediciones electrofisiológicas efectuadas a lo largo del trayecto auditivo, John F. Olsen, entonces doctorando mío y hoy en la Universidad de Stanford, observó que había neuronas de ciertas regiones del colículo inferior especializadas en sintonizar frecuencias únicas: FC_1, FC_2 o FC_3. Esas células nerviosas envían señales a una región del cuerpo geniculado medio para la integración de las mismas; así, las neuronas de esta región responden a la combinación de frecuencias FC_1 con frecuencias específicas FC_2 o FC_3. A continuación, estas neuronas se proyectan hacia el área FC/FC de la corteza auditiva.

Hasta ahora me he limitado a describir el procesamiento auditivo de los componentes FC de biosonar. Pero el murciélago bigotudo emite también un sonido FM al final del componente FC. ¿Con qué propósito? La señal FM suministra el primer indicio para medir el intervalo temporal entre una pulsación y un eco, y, por tanto, la distancia hasta un objetivo. La demora de un eco en un milisegundo corresponde a una distancia del blanco de 17,3 centímetros (a una temperatura del aire de 25 grados Celsius). Simmons observó que varias especies de murciélagos detectaban una diferencia de distancias de entre 12 y 17 milímetros, ¡lo cual significa que podrían detectar una diferencia en la demora del eco de entre 69 y 98 millonésimas de segundo!

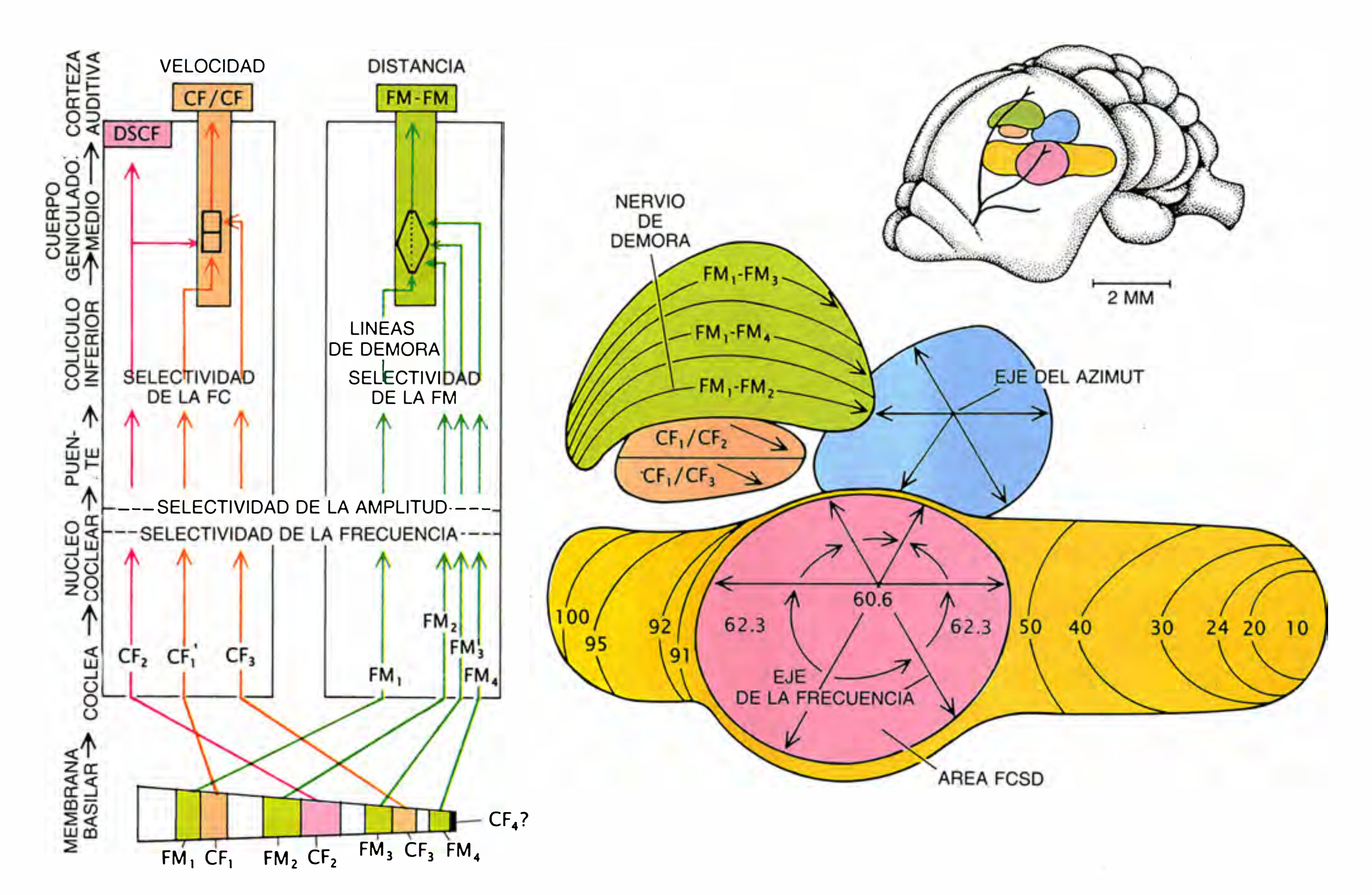
La información elaborada, en este caso la demora del eco, está representada, como en el área FC/FC, por un "mapa" en una región definida de la corteza auditiva; nosotros la llamamos área FM-FM. Allí, las neuronas desencadenan una respuesta muy pobre si la pulsación, eco, tono FC o sonido FM se presentan aislados; pero responden vigorosamente ante una pulsación acompañada por un eco que tenga un determinado tiempo de demora. En casos extremos, la sensibilidad de la neurona FM-FM a un par pulsación-eco puede multiplicar por 28.000 la manifestada ante una de estas señales por separado.

Las neuronas FM-FM comparan las pulsaciones FM_1 emitidas con el eco retardado FM_2, FM_3 o FM_4. Cada uno de los tres tipos de neuronas sensibles al retraso se agrupa con su propia subdivisión. Cada neurona FM-FM se ajusta o sintoniza a una demora del eco; la mayoría prefiere también una amplitud particular de eco. En virtud de ello, la mayoría de las neuronas FM-FM responden ante un objetivo que se halla a cierta distancia y posee determinado tamaño.

La organización funcional del área FM-FM apoya nuestra idea de que el área en cuestión se dedica, sobre todo, al procesamiento de la información concerniente a la distancia. Cada columna de neuronas responde a una determinada demora del eco; las columnas se disponen de suerte tal que las demoras preferidas se incrementen a lo largo de un eje. Este eje representa retrasos de 0,4 a 18 milisegundos, o rangos de objetivos desde 7 hasta 310 centímetros. El poder resolutivo de este grupo de neuronas capacita al animal, así se presume, para detectar diferencias, en la distancia al objetivo, de unos 10 milímetros. Y, en efecto, los estudios realizados por Simmons sobre la conducta de los murciélagos abonan esa presunción.

¿Cómo van apareciendo, en el trayecto del sistema auditivo, las neuronas que se muestran sensibles a los retardos pulsación-eco? Lo mismo que ocurría con las neuronas que respondían a la combinación de frecuen-

7. GRACIAS A LA RED NEURONAL se crean neuronas que responden a una demora específica del eco. La red retarda la respuesta a una pulsación FM_1, para que llegue a la neurona al mismo tiempo que la respuesta a un armónico más elevado del eco FM, provocando la excitación de la neurona en cuestión. La respuesta de la pulsación se ve frenada por una combinación de retrasos axonales (toda vez que el recorrido de un impulso nervioso a lo largo de un axón tarda cierto tiempo) y retrasos sinápticos. Pueden incluso crearse, por inhibición, demoras mayores. La neurona *A* inhibe las neuronas 17 a 32; pasado un tiempo, la inhibición desaparece a partir de la neurona 17, y las neuronas se excitan durante un breve intervalo. (Los colores más claros simbolizan demoras mayores.) Por otro lado, la respuesta al eco se extiende simultáneamente a todas las neuronas.



8. TRAYECTOS PARALELOS elaboran flujos de información de biosonar diferentes. Varios armónicos FC (o CF) y FM excitan partes distintas de la membrana basilar; las señales se envían a la corteza auditiva, a través de núcleos subcorticales. Más avanzada la vía auditiva, las neuronas adquieren finura selectiva para la frecuencia y la amplitud. En la corteza auditiva primaria, las frecuencias de 10 a 100 kilohertz se organizan tonotópicamente (*amarillo*); la gran área central (*rosa*) representa de 60,6 a 62,3 kilohertz. Las señales FC y FM están integradas en el cuerpo geniculado medio; hallamos así neuronas que responden a señales de combinaciones específicas de FC y FM, neuronas que proyectan sus axones hacia las áreas FC/FC o FM/FM de la corteza auditiva, levantando mapas de la velocidad relativa del objetivo (*marrón*) o la distancia (*verde*).

cias, las estimuladas por las demoras pulsación-eco surgen en el cuerpo geniculado medio. Para averiguar la inserción de estas neuronas en la trayectoria auditiva, Olsen les inyectó peroxidasa de rábano, que se difunde por las vías nerviosas. La substancia se dirigió hacia dos grupos distintos de células del culículo inferior, así como hacia el área FM-FM de la corteza auditiva.

Los dos grupos de neuronas coliculares, uno especializado en las pulsaciones FM_1 y el otro en los armónicos superiores del eco FM, convergen, sin lugar a dudas, en un mismo grupo neuronal del cuerpo geniculado medio, para crear neuronas sensibles a las combinaciones de los componentes de FM. John A. Butman, doctorando de mi laboratorio, ha demostrado que esa sensibilidad de combinación viene mediada en buena parte por el receptor de N-metil-D-aspartato (NMDA). Las propiedades biofísicas del receptor causan la amplificación de la respuesta de las neuronas cuando se reciben simultáneamente señales neurales. Por tanto, el receptor realiza la operación lógica "Y" (como en el caso "SI *A* Y *B*, ENTONCES *C*").

¿En virtud de qué se tornan sensibles, esas neuronas, a la demora del eco? Olsen observó que las neuronas FM-FM del cuerpo geniculado medio no respondían al retraso del eco con el vigor mostrado por las neuronas FM-FM de la corteza auditiva, si bien respondían en cierto grado a las pulsaciones y ecos que no iban ligados. Curiosamente, estas neuronas tardan más en reaccionar ante las pulsaciones FM_1 que ante el eco FM_2, FM_3 o FM_4. Y lo que merece mayor atención, la diferencia en la latencia de la respuesta es la misma que la de la demora pulsación-eco óptima para cada neurona.

De esas observaciones se infiere un interesante mecanismo para calcular la demora del eco. Cuando un murciélago oye la pulsación FM_1 emitida por él mismo, la respuesta neural se va retrasando en su trayectoria hacia el cuerpo geniculado medio. Pero la respuesta del eco que retorna no sufre tal retraso. Así, pues, la respuesta retardada a la pulsación arriba hasta una determinada neurona del cuerpo geniculado medio en el mismo momento en que la respuesta del eco, que no ha sufrido retraso. La coincidencia de ambas respuestas provoca que la neurona genere su propia señal. Semejante guión teórico apunta hacia la existencia de una red neuronal donde múltiples líneas de retardo constituyan un entramado de neuronas capaz de responder a una gama de demoras del eco.

¿Dónde se alojan estas líneas de retraso? ¿En el cuerpo geniculado medio o cerca de la periferia? Vimos, más arriba, la diferencia en latencia de respuesta ante pulsaciones y ecos procedentes del colículo inferior; por consiguiente, deducimos, algunas líneas de retardo deben ubicarse en el propio colículo inferior. En el murciélago bigotudo, el colículo inferior es un vasto núcleo que sobresale entre el cerebro y el cerebelo. Las fibras nerviosas ascienden desde la porción lateroventral del colículo hasta su porción mediodorsal. Los impulsos recorren una distancia de unos dos milímetros a través de las fibras, excitando a 100 o más neuronas en su trayecto e introducen demoras de hasta ocho milisegundos.

Recordemos, sin embargo, que los

retardos en el área FM-FM de la corteza auditiva son del orden de 18 milisegundos. Por tanto, las líneas de demora del colículo inferior no determinan el cómputo global de demoras. A tenor de los datos, las sinapsis inhibidoras, en el cuerpo geniculado medio, crearían retrasos adicionales.

Hemos explicado, hasta aquí, de qué modo los murciélagos bigotudos averiguan la velocidad y la distancia de una posible presa. Pero hemos dejado, en el camino, la cuestión de la emisión, por su parte, de un repertorio de armónicos. ¿Por qué no basta un armónico? Desde el punto de vista técnico no habría inconveniente en ello, pero el animal ha de enfrentarse con otro problema. Los murciélagos viven en colonias con cientos de murciélagos más; de un modo u otro han de poder recurrir a la ecolocación sin confundirse. Varios mecanismos, incluido el oído binaural, les facilitan dominar ese enmarañado tráfico aéreo. Un importante mecanismo depende del primer armónico.

El primer armónico, el componente más débil de la pulsación emitida, contiene menos del 1 por ciento de la energía total de la pulsación. De hecho, la pulsación es tan liviana que los restantes murciélagos apenas pueden oírla. En vuelo, lo que oye de sus propios compañeros de refugio es, sobre todo, los armónicos superiores. Ahora bien, las combinaciones de armónicos más altos no pueden excitar las neuronas FM-FM o FC/FC. Cuando un murciélago emite una pulsación, puede, sin embargo, oír su propio primer armónico, conducido desde sus cuerdas vocales hasta sus oídos a través del tejido circundante. Dicho sonido, en combinación con los armónicos superiores que sufren demora o se hallan sometidos al corrimiento Doppler, pueden estimular, entonces, las neuronas FM-FM y FC/FC. De este modo, el procesamiento nervioso de las señales de biosonar queda protegido de la cacofonía de los ecos producidos por la colonia.

La supresión del primer armónico confiere otra ventaja notable. Muchas especies de mariposas nocturnas, para evitar su depredación, poseen "detectores de murciélagos", receptores auditivos muy sensibles a sonidos de entre 15 y 40 kilohertz y, poco, a frecuencias más altas. Al prescindir del primer armónico, que está entre 24 y 31 kilohertz, un murciélago bigotudo puede acercarse a las mariposas sin miedo a alertarlas.

El oído es tan importante para los murciélagos como los ojos para los animales que se orientan por la visión. No debe, pues, sorprendernos descubrir pruebas de un refinado cómputo nervioso en la corteza auditiva de los murciélagos. Pero el sonido encierra también su interés biológico en muchos otros animales. ¿Se hallan dotados éstos de mecanismos neurales similares? Muchos, sí.

Robert R. Capranica, de la Universidad de Cornell, y Albert S. Feng, de la de Illinois en Urbana-Champaign, han descubierto que las ranas procesan sonidos complejos, tales como las llamadas de apareamiento, por medio de neuronas que responden a combinaciones de elementos de dos señales esenciales. Daniel Margoliash, de la Universidad de Chicago, ha observado neuronas similares en las aves canoras. El procesamiento de sonidos de interés biológico por neuronas sensibles a las combinaciones se nos presenta así como un importante mecanismo nervioso que comparten animales muy distintos.

Parece probable que el sistema auditivo humano acuda, también, a esos tramados neuronales para elaborar los sonidos del habla. Aun cuando el análisis del lenguaje oral sea exclusivo de nuestra especie y función, predominantemente, del neocórtex, la región auditiva subcortical, con sus neuronas sensibles a las combinaciones, quizá procesa los sonidos del habla en mayor grado de lo que se ha venido creyendo. El trabajo pionero de Mountcastle, Hubel y Wiesel ha demostrado que, en la corteza somatosensorial y en la corteza visual de monos y gatos, subyacen mecanismos similares. De nuestro trabajo sobre la corteza auditiva de los murciélagos se beneficia no sólo el conocimiento del sentido auditivo, sino también todo el sistema sensorial.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE EXTENT TO WHICH BIOSONAR INFORMATION IS REPRESENTED IN THE BAT AUDITORY CORTEX. Nobuo Suga en *Dynamic Aspects of Neocortical Function*. Dirigido por Gerald M. Edelman et al. John Wiley & Sons, Inc., 1984.

INHIBITION AND LEVEL-TOLERANT FREQUENCY TUNING IN THE AUDITORY CORTEX OF THE MUSTACHED BAT. Nobuo Suga y Koichi Tsuzuki en *Journal of Neurophysiology*, vol. 53, n.º 4, págs. 1109-1145; abril de 1985.

AUDITORY FUNCTION: NEUROBIOLOGICAL BASES OF HEARING. Dirigido por Gerald M. Edelman, W. E. Gall y W. M. Cowan. John Wiley & Sons, Inc., 1988.

Ciencia y sociedad

¿Fantasmas?

¿En qué estado se hallan cuatro polémicas teorías? Ocuparon incluso los titulares de los periódicos. Duraron varias semanas en el candelero. Quien más quien menos echó su cuarto a espadas. Pero, ¿qué fue de ellas?

Fusión fría. Ha transcurrido más de un año desde que B. Stanley Pons y Martin Fleischmann anunciaron haber conseguido la fusión nuclear mediante la circulación de corriente eléctrica a través de una bobina de paladio inmersa en un recipiente lleno de agua pesada. Laboratorios de todo el mundo se aprestaron a confirmar aquellos resultados y, aunque unos pocos afirman haber encontrado algunos excesos fugaces de calor o de radiación, la gran mayoría no han encontrado nada que permita hablar de fusión fría.

El último martillazo lo han dado investigadores de la propia Universidad de Utah, donde Fleischmann y Pons realizaron buena parte de sus experimentos. Un equipo dirigido por el físico Michael H. Salamon ha publicado en *Nature* que, después de cinco semanas de utilizar el mismo aparato que Fleischmann y Pons emplearon, no han observado ningún signo de fusión.

Pons y Fleischmann han negado veracidad a esa conclusión, pero no han aportado ninguna prueba. ¡Sin embargo, ellos no tienen por qué preocuparse! A pesar de que sus resultados han sido rechazados por la mayor parte de la comunidad científica, durante el año pasado han recibido 5 millones de dólares del estado de Utah, 400.000 de la Secretaría de Investigación Naval y una aportación generosa de un mecenas anónimo para proseguir sus investigaciones.

Petróleo no biológico. Esta teoría, avanzada por Thomas Gold, de la Universidad de Cornell, comparte con la fusión fría la promesa de una fuente de energía inagotable. Gold cree que el petróleo y el gas no provienen de la materia orgánica (la idea aceptada), sino de la mezcla de los materiales primordiales de la Tierra. Gold mantiene que se almacenan en el manto terrestre grandes cantidades de estos preciosos combustibles.

En 1986 Gold convenció a las autoridades suecas y a numerosos inversores privados para que financiaran un proyecto de perforación que serviría para corroborar la teoría. El experimento se llevó a cabo en el distrito sueco de Siljan, donde hace más de 300 millones de años cayó un asteroide y cuya geografía está salpicada de filtraciones de petróleo y de gas. Los geólogos suelen opinar que los hidrocarburos proceden de depósitos sedimentarios cercanos a la superficie; para Gold, han ascendido desde el manto tras el impacto del asteroide. La perforación de un pozo en el granito del viejo cráter producido abriría un enorme almacén de petróleo y gas. Eso afirmaba.

Cuatro años después, gastados 33 millones de dólares y perforados 6,8 kilómetros de roca sólida, el proyecto se ha suspendido sin haber asomado el manantial del petróleo. Se ha taponado el agujero y cerrado la perforación. Gold dice haber encontrado rastros de gas o de petróleo filtrándose desde abajo, a lo que científicos independientes responden atribuyendo este "resultado" al combustible diesel que él usaba como lubricante para la perforación. Las autoridades suecas se han retirado del proyecto.

Impertérrito, Gold insiste en perforar un nuevo pozo, o mejor aún, dos pozos de 7,5 kilómetros que demostrarían la validez de su teoría. El y los inversores privados que lo apoyan están buscando los recursos económicos necesarios. "Si todo va bien", explica, los nuevos pozos costarían cada uno "sólo 12 millones de dólares".

Pequeños cometas. Durante el tiempo en que el lector lee este párrafo, varios trozos de hielo del tamaño de una casa colisionan con la atmósfera terrestre y se evaporan. Mediante el bombardeo constante de la Tierra de estas enormes bolas de nieve, durante miles de millones de años, se han llenado los océanos. Louis A. Frank, de la Universidad de Iowa, propuso esta sorprendente teoría en 1986 después de encontrar manchas oscuras en las imágenes de la Tierra obtenidas por el satélite *Dynamics Explorer I*.

Otros astrónomos, dudando de que la muchedumbre de cometas avistada por Frank pudieran haberse ignorado durante tanto tiempo, descartan esa interpretación y atribuyen las señales a ruido. No había, además, datos que lo corroborasen.

Sin embargo, a imagen de la fusión fría, los pequeños cometas han recibido apoyo suficiente de otros científicos, quienes han evitado que se incluyeran en el capítulo de las alucinaciones. Clayne M. Yeates, del Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena, afirma que los débiles destellos que registró en el Observatorio Nacional de Kitt Peak en 1987 fueron causados por pequeños cometas. Más recientemente, John J. Olivero, de la Universidad estatal de Pennsylvania, ha sugerido que las ráfagas de microondas que ha detectado en la alta atmósfera durante los últimos cinco años podrían corresponder a bolas de hielo vaporizándose.

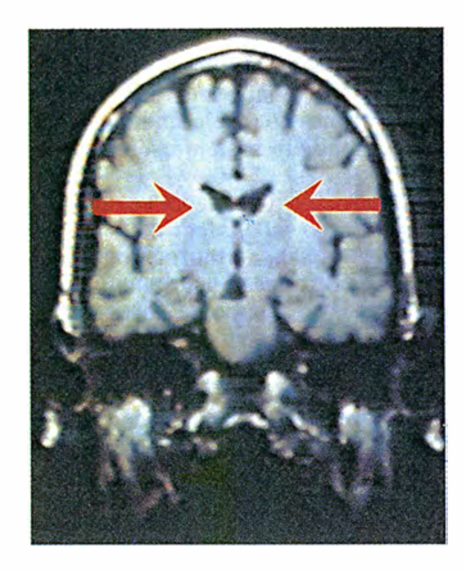
La quinta fuerza. Esta teoría, a diferencia de las tres anteriores, no tiene su prohombre defensor, aunque comparte con las demás haber sabido allegar recursos, sin que parezca importar la falta de solidez. La historia comienza en 1986 cuando Ephraim Fischbach, de la Universidad de Purdue, encontró sutiles anomalías en las medidas de la gravedad obtenidas a comienzos de siglo por el físico húngaro Roland von Eötvös. Fischbach sugirió que las anomalías estaban producidas por una quinta fuerza de la naturaleza (las otras cuatro son la gravitatoria, la electromagnética y las fuerzas nucleares fuerte y débil) que contrarrestaba la gravedad en distancias de varios centenares de metros.

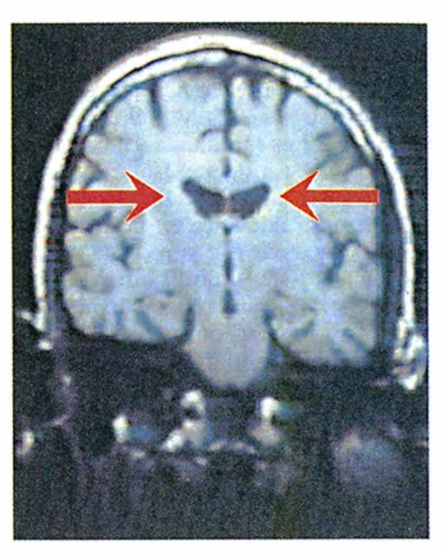
Los físicos sometieron a prueba la

hipótesis de Fischbach midiendo la gravedad en emplazamientos exóticos: la cima de una torre de radio, en el interior de minas y bajo la capa de hielo ártico, con el objetivo de minimizar la distorsión producida por características geológicas desconocidas. Algunos grupos pretendieron haber encontrado pruebas de la fuerza repulsiva propuesta por Fischbach, pero otros descubrieron (¡una sexta fuerza quizás!) algo que apuntaba en la dirección contraria. Los teóricos empezaron a tejer explicaciones para los datos, algunas de las cuales resolvían elegantemente determinados problemas de física de partículas.

Sin embargo, desde el pasado otoño, los informes negativos acerca de la quinta fuerza se apilan. El último lo ha redactado un grupo del Laboratorio Geofísico de la Fuerza Aérea, en Bedford, que antes había advertido signos de fuerzas no newtonianas en un experimento en una torre de radio. Reconocieron en la revista *Physical Review Letters* que sus datos originales probablemente derivaban de variaciones en la densidad del terreno, argumento que los escépticos habían usado desde el comienzo.

Hay, no obstante, quien sigue empecinado en la captura de fuerzas fantasmagóricas. Un grupo espera obtener trazas de ellas en el océano Pacífico. Otro, que el pasado año detectó anomalías gravitatorias en el casquete de hielo de Groenlandia, se propone proseguir su experimento en la Antártida. Un tercer grupo anda a la búsqueda de antiprotones en el vacío. Parece que esta teoría, como las otras, servirá de pasto, espléndidamente subvencionado, para muchos.





1. *UN ESQUIZOFRENICO* (derecha) *presenta ventrículos mayores (entre flechas) y, por tanto, un cerebro menor que su gemelo univitelino no esquizofrénico, como puede verse en esta imagen por resonancia magnética obtenida por los investigadores del Instituto Nacional de la Salud Mental. Otros investigadores opinan que, debido a la variabilidad del tamaño de los ventrículos en la población, este rasgo no sirve para el diagnóstico de la esquizofrenia.*

La esquizofrenia

Durante un reciente simposium sobre esquizofrenia, E. Fuller Torrey, del Instituto Nacional de la Salud Mental, calificó la situación que atraviesa esta disciplina como "la mejor y la peor de toda su historia". Los psiquiatras disponen ahora de drogas eficaces para su tratamiento —trastorno que se cree afecta a una de cada 100 personas de la población mundial— y de técnicas potentes para su estudio. Sin embargo, la legión de esquizofrénicos sin hogar que deambulan por las calles de las grandes ciudades son testimonio de un escandaloso fracaso en la cura de esta enfermedad.

Casi todos los especialistas en enfermedades mentales reconocen un progreso en este campo desde 1960, cuando se veía en la esquizofrenia un trastorno psicológico más. La introducción de modelos biológicos ha permitido abandonar la idea de que la esquizofrenia sea mero resultado de la conjunción de una personalidad débil y una escasa vida familiar. Pero, a pesar de los informes que atestiguan un avance, la enfermedad se resiste con tenacidad a su investigación y su tratamiento.

Parte del problema reside en las múltiples caras con que puede presentarse. Según el manual de diagnóstico de la Asociación Americana de Psiquiatría, esta enfermedad produce ilusiones, alucinaciones (sobre todo voces) y, en general, la fragmentación de percepciones, pensamientos y emociones. El comportamiento esquizofrénico oscila entre el "grosero e impropio" y el catatónico. Síntomas similares pueden asociarse a la manía, la depresión, la demencia y otras alteraciones.

Esa institución, en su esfuerzo por precisar la definición, ha establecido unos criterios de diagnóstico más exclusivos: los síntomas deben presentarse antes de los 45 años y persistir durante al menos 6 meses. A pesar de todo, muchos investigadores continúan opinando que el síndrome abarca varias enfermedades. Ahí puede estar la razón de que los pacientes esquizofrénicos respondan de forma tan dispar a la terapia con drogas. El descubrimiento de la eficacia de drogas neurolépticas —"secuestraneuronas"— se considera a menudo un hito en la historia de la medicina. Sin embargo, los neurolépticos, que bloquean los receptores para el neurotransmisor dopamina, reprimen, que no eliminan, los síntomas; su efecto es, además, variable. Los fármacos producen también una sensación de estupefacción y una respuesta afectiva débil: una personalidad apagada. Con el tiempo, acarrean alteraciones nerviosas, denominadas disquinesias tardías, que provocan contracciones espasmódicas de los músculos.

Estos efectos secundarios podrían explicar por qué un alto porcentaje de esquizofrénicos —como mínimo un 36 por ciento después de un año— interrumpe el tratamiento con fármacos, a pesar de que ello comporte casi siempre la recaída. Si se rebajan las dosis administradas, remiten los efectos secundarios, pero crecen simultáneamente las posibilidades de recidiva.

Los investigadores buscan fármacos con menos efectos secundarios y un tratamiento para los pacientes más graves —aproximadamente 3 de cada 10 esquizofrénicos— que no responden, en absoluto, a los neurolépticos tradicionales. La clozapina ha mostrado resultados prometedores en el tratamiento de este grupo de pacientes, pero puede provocar ataques y agranulocitosis, una alteración sanguínea de consecuencias potencialmente fatales.

El desarrollo de la genética ha abierto la posibilidad de que la esquizofrenia se cure, quizás, algún día mediante terapia génica. Partiendo de un análisis estadístico, Kenneth S. Kendler, de la Facultad de Medicina de Virginia, concluye que, como mínimo parcialmente, es una enferme-

dad de transmisión hereditaria. Según numerosos estudios, aunque un 1 por ciento de la población desarrolla esquizofrenia, ésta afecta del 3 al 7 por ciento de los familiares (hermanos, padres y descendientes).

A finales de 1988, se dio un supuesto paso adelante en la ardua tarea de localizar el "gen de la esquizofrenia". Un equipo dirigido por Hugh Gurling, de la Universidad de Londres, anunció en *Nature* que había descubierto una asociación entre los marcadores génicos en el cromosoma 5 y la incidencia de la esquizofrenia en familias de Gran Bretaña e Islandia. Sin embargo, en el mismo número de esa revista, un grupo de la Universidad de Yale, dirigido por Kenneth E. Kidd, señalaba no haber encontrado semejante asociación al analizar in extenso los lazos de parentesco de una familia sueca. Posteriores estudios también han dado resultados negativos.

Kidd opina que la identificación de los genes responsables de la esquizofrenia se encuentra en un verdadero atolladero. Considera que es posible que numerosos genes, por sí solos de efecto mínimo o nulo, cooperen creando una predisposición a la enfermedad, que se desencadena entonces por factores ambientales. Si así fuera, comenta, nunca se identificarían los genes responsables.

Dejando de lado el descubrimiento de los marcadores génicos, los investigadores buscan ahora factores que ayuden en el diagnóstico y al mismo tiempo aporten algo a la definición de la etiología del mal. En ese sentido, los médicos saben desde hace décadas que muchos esquizofrénicos tienen dificultades en seguir con la vista un objeto en movimiento. Esta alteración que padecen sólo el 8 por ciento de la población total, se presenta en el 65 por ciento de los esquizofrénicos y en el 45 por ciento de los familiares cercanos, según un estudio de Philip S. Holzman, de la Universidad de Harvard. Pero esta observación, que resulta curiosa, no se considera decisiva a efectos de diagnóstico.

También se ha investigado el cerebro de los esquizofrénicos en busca de anomalías. El hecho de que los neurolépticos interesen la transmisión por dopamina y que la sobredosis de anfetaminas, que estimulan la producción de dopamina, provoque síntomas similares a los de la esquizofrenia, ha llevado a suponer que los esquizofrénicos presentan un exceso de un determinado tipo de receptores de dopamina, denominado receptor D_2. Sin embargo, Göran Sedvall, del Instituto Karolinska de Estocolmo, señaló recientemente que barridos del cerebro con tomografías de emisión de positrones no revelaron indicios en los que pudiera sustentarse esta teoría.

Un artículo publicado en el *New England Journal of Medicine*, en marzo, asegura haber confirmado la existencia de otro rasgo neuroanatómico, del que hace tiempo se sospechaba. El estudio, llevado a cabo por un grupo en el NIMH, comparó imágenes obtenidas por resonancia magnética de cerebros de 15 esquizofrénicos con las de los cerebros de sus gemelos univitelinos no esquizofrénicos. Todos menos uno de los esquizofrénicos presentaban ventrículos (cavidades rellenas de líquido en el centro del cerebro) ligeramente mayores y, por tanto, menos materia gris que sus gemelos.

Teniendo en cuenta que los gemelos son genéticamente idénticos, estas observaciones sugieren que el incremento de tamaño del ventrículo —y, en consecuencia, la esquizofrenia— viene determinado por factores ambientales. Torrey, del NIMH, dice que el "factor X" puede ser un trauma físico, una toxina o un agente infeccioso. "Mi propio sistema de ilusiones depende de un virus" añade. La opinión de los padres de esquizofrénicos, que los consideran "distintos" desde su mismo nacimiento, le mueve a Torrey sugerir que el factor X podría actuar tempranamente. Otras estadísticas abonan un factor prenatal: la proclividad de los esquizofrénicos a sufrir complicaciones en el útero o durante el parto duplica la media y en un porcentaje ligeramente superior a la media nacieron en invierno o a principios de la primavera, cuando las infecciones víricas son más frecuentes.

Otros investigadores han puesto en duda el valor del estudio de los gemelos. Para Kidd no está claro si las anomalías de los cerebros de los esquizofrénicos representan una causa de la enfermedad, un efecto (quizá debido a la terapia con fármacos o al estrés) o ni lo uno ni lo otro. Para otros, las anomalías, irrelevantes, no facilitan el diagnóstico de una población.

Por supuesto, todos estos esfuerzos serían innecesarios si la esquizofrenia desapareciera. En un reciente artículo en *Lancet*, tres investigadores del Instituto de Psiquiatría de Londres se planteaban: "¿Está desapareciendo la esquizofrenia?". Contestan con un tímido "sí". Los ingresos en hospitales de esquizofrénicos de Inglaterra y Gales han disminuido hasta el 50 por ciento desde mediados de los años sesenta.

Aquellos genes verdes

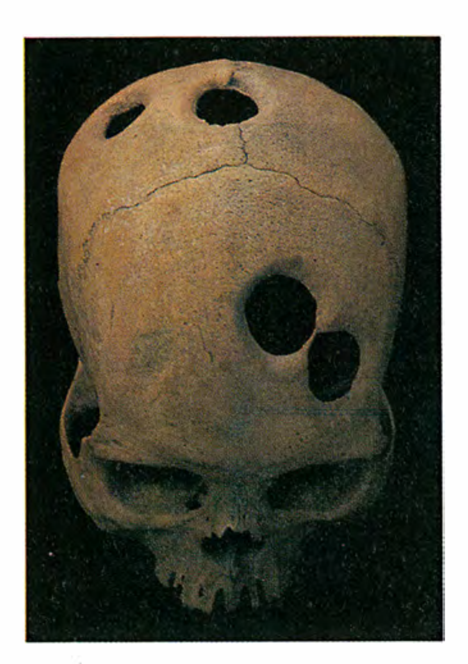
En un ventoso día de otoño de hace 20 millones de años, en un lago agonizante situado en lo que hoy día es el norte de Idaho, una hoja cayó de un magnolio y se hundió en las aguas estancadas y heladas. Intercalada entre capas de fango y de esquistos, la hoja sobrevivió incólume a la desecación del lago. Allí la encontró, el año pasado, un equipo de científicos. "Cuando rompimos la capa de sedimento, la hoja conservaba todavía un color verde oscuro", recuerda David E. Giannasi, de la Universidad de Georgia. "También estaba húmeda".

No sólo persistió la morfología foliar. Con ella, lo hicieron frágiles moléculas de ADN portadoras de algunos de sus genes. Giannasi, sus colegas Edward M. Golenberg y Michael T. Clegg, de la Universidad de California en Riverside, y otros explicaban recientemente en *Nature* cómo aislaron y analizaron este ADN. Su investigación puede abrir la vía a muchos estudios en los que la biología molecular y la paleontología aúnan sus fuerzas para esclarecer la historia evolutiva de las plantas.

La mayoría de los fósiles, completamente mineralizados, no contienen ADN. La madera petrificada, por ejemplo, es un molde rocoso de materia vegetal antigua donde los materiales inorgánicos han sustituido a los orgánicos. La hoja de magnolio que Golenberg y su equipo descubrieron, al igual que millones de otros restos de plantas, peces e insectos antiguos del yacimiento de esquistos de Clarkia, en el estado de Idaho, pertenece a un tipo denominado fósil de compresión. Los sedimentos fríos y desprovistos de oxígeno del fondo del lago prensaron la hoja e impidieron su descomposición.

Durante los últimos años de la década de 1970, Giannasi y Karl J. Niklas, hoy en la Universidad de Cornell, demostraron que algunos fósiles de Clarkia contenían todavía biomoléculas y estructuras subcelulares como las de las plantas modernas. Giannasi y Clegg sugirieron la posibilidad de que parte del ADN de los fósiles se hallara también intacto; por entonces, sin embargo, se carecía de capacidad técnica para aislar este ADN.

Mas, a lo largo de los últimos diez años, se ha avanzado a grandes pasos. El descubrimiento de la reacción en



2. ESTOS AGUJEROS de fino reborde dan fe de la supervivencia de un ciudadano inca a cinco trepanaciones. (En el occipital hay otro agujero.) El cráneo se conserva en el Museo Nacional de Antropología y Arqueología de Perú.

cadena de la polimerasa hizo posible duplicar cantidades minúsculas de ADN fósil en número suficiente para la experimentación. Ordenadores más rápidos facilitaron, por su lado, el análisis de las secuencias de ADN.

En julio de 1989 los expertos recolectaron en Clarkia fragmentos de 55 hojas fósiles de diferentes plantas. Las muestras tuvieron que prepararse para el análisis inmediatamente después de su descubrimiento, cuenta Clegg: a los pocos minutos de su exposición al aire, la descomposición, tanto tiempo postergada, las hubiera hecho ennegrecer y arrollarse.

Trabajando con la muestra de la hoja de magnolio, Golenberg aisló y analizó un fragmento de un gen denominado *rbc*L, que se halla implicado en la fotosíntesis. Comparó, después, la secuencia de ADN del *rbc*L del magnolio prehistórico con la de un magnolio moderno, y encontró que el gen había cambiado poco con el tiempo: sólo diferían 17 pares de bases de un total de 820. El número discrepante aumentaba cuando se comparaba el gen con los de plantas de parentesco más lejano.

Para Giannasi, las comparaciones genéticas entre plantas fósiles y actuales arrojan luz en el estudio de las estirpes evolutivas de las especies vegetales y sus características. El parecido de muchas plantas no emparentadas obedece a que evolucionaron sometidas a las mismas condiciones ambientales; las similitudes entre los genes constituyen una prueba sólida del parentesco real. El paso siguiente será extraer secuencias de genes para una docena o más de especies fósiles: Golenberg ha secuenciado ya genes de un sicómoro fósil y ha empezado a trabajar con un ejemplo de un grupo fósil extinguido llamado *Pseudofagus*.

Otros investigadores han extraído ADN de animales fósiles que sólo tienen unas cuantas docenas de miles de años de antigüedad. Los fósiles animales de Clarkia, de varios millones de años, ¿podrían también proporcionar ADN? "Parece posible", dice Giannasi. "Alguien debería echarles una ojeada a estos peces".

Trepanación inca

Diríase que para ciertas culturas antiguas había cosas peores que tener pájaros, o agujeros, en la cabeza. A tenor del registro arqueológico, los norteafricanos practicaban la trepanación hace ya 12.000 años. Los europeos del Neolítico horadaban el cráneo de sus semejantes cinco mil años atrás, por lo menos.

En el Nuevo Mundo ese acto quirúrgico comenzó más tarde. La edad de los cráneos trepanados más antiguos se remonta a sólo 2400 años de antigüedad. Pero los pueblos de América del Sur, los protoperuanos en particular, se esmerarían en esa práctica como nadie hasta entonces. Cuarta y media sacaba, en desarrollo, la peruana a las demás culturas, admiten algunos historiadores.

Lo cierto es que, en Perú, se han desenterrado dos tercios de los 1500 cráneos trepanados que los arqueólogos han identificado. No ha sido fácil su análisis, dispersos como están por las vitrinas de los museos de Europa y América y de colecciones privadas. Ello no arredra a J. Michael Williams, de la Universidad de Hahnemann, y John W. Verano, de la Institución Smithsoniana, que están decididos a crear una base de datos donde se recojan todos los detalles relativos a los cráneos horadados, con el propósito último de facilitar la investigación paleopatológica.

Sabíase, por anteriores investigaciones, que los peruanos trepanaban perforando, raspando o excavando la caja craneana. Solían hacerlo en círculo, aunque a veces delimitaban una figura rectangular; se servían de útiles líticos o metálicos. No era infrecuente repetir la trepanación en un mismo individuo. Hasta siete agujeros se han encontrado en una cabeza.

Parece incontestable que los peruanos recurrían a la trepanación para aliviar la opresión craneal ejercida por una lesión; muchos cráneos muestran signos de fractura y otros tipos de agresión traumática. "Era gente de palo y honda fácil", aclara Verano. Mas la ausencia de señales de lesiones en otros cráneos induce a pensar que ese procedimiento quirúrgico pudiera aplicarse también en casos de epilepsia, dolores pertinaces de cabeza y otras encefalopatías. Es ésta una tesis que Williams y Verano están decididos a someter a prueba. Y esperan determinar también si los médicos incas sabían dónde no perforar para evitar dañar zonas especialmente delicadas, como las cubiertas por grandes arterias y tejido muscular.

Los peruanos dejaron la práctica de la trepanación al filo de la colonización española. No hay, al menos, relato alguno que haga referencia a la misma. En opinión de Verano, los europeos se hubieran podido beneficiar de la habilidad inca en la trepanación, pues más de la mitad de los cráneos afectados evidencian señales de curación. La cirugía no alcanzaría, de nuevo, esa cota de perfección hasta las postrimerías del siglo XIX.

Electroconformado: de ayer a hoy

En un mundo en el que una gran parte de técnicas nacen hoy y envejecen en un corto intervalo de tiempo, sorprenden algunos procesos a los que el paso de los años parece no afectarles demasiado; antes bien, podría decirse que los dota de mayor vigencia. El *electroconformado* es un buen ejemplo de ello.

Difícilmente podía imaginar Moritz Hermann von Jacobi, letoniano afincado en Alemania, que la técnica que con éxito usaba en 1838 para reproducir con fidelidad láminas metálicas impresas, y que denominó "galvanoplastia", se utilizaría unos 150 años más tarde para la reproducción holográfica, la producción de discos compactos, la manufactura de minúsculos aparatos de auxilio a la sordera y la fabricación de piezas clave de los modernos aceleradores de partículas. Sin citar el empleo de esta técnica en la elaboración de miles de microdispositivos diferentes para múltiples aplicaciones tecnológicas.

Pero, ¿qué es la "galvanoplastia", denominada así por Jacobi, o el "electroconformado", su nombre ac-



3. Moritz Hermann von Jacobi (1801-1874)

tual? Se trata del proceso que permite la obtención de objetos por electrodeposición metálica sobre una matriz o molde, que se separan luego del electrodepósito metálico formado. En este aspecto, el "electroconformado" o "galvanoplastia" se distingue de la electrodeposición metálica común ("galvanostegia"), en que la película formada, que reproduce el objeto, se separa por entero del substrato sobre el cual se depositó, mientras que, en la galvanostegia, la película queda fuertemente adherida a dicho substrato. Al principio, el electroconformado se aplicó, de manera casi exclusiva, a la reproducción de láminas para tipografía y a la manufactura de troqueles para discos gramofónicos. Otro uso, menos frecuente, estuvo centrado en la creación de objetos artísticos.

El electroconformado se emplea en la obtención industrial de un sinnúmero de objetos: discos fonográficos, afeitadoras eléctricas, tarjetas de felicitación en relieve, etc., entre otros usos.

Recordemos algunos de éstos. Los hologramas son imágenes en tres dimensiones creadas por técnicas muy refinadas en que intervienen láseres e instrumentos ópticos precisos. Los primeros hologramas se obtuvieron hace unos veinticinco años en la Universidad de Michigan, pronosticándoseles un considerable éxito comercial. Sin embargo, las técnicas de creación y duplicación de los mismos, por su gran complicación, los hicieron económicamente prohibitivos durante muchos años. Con excepción de unas pocas aplicaciones militares y científicas de alta tecnología, la holografía quedó cerrada para el mercado. Ahora bien, con el desarrollo de los nuevos láseres, más potentes y menos caros y con los modernos procedimientos de reproducción por electroconformado, los hologramas pueden crearse ya a un coste aceptable.

La producción de hologramas por técnica del electroconformado atraviesa diez fases, al cabo de las cuales se logra la estampación del plástico aluminizado. Los hologramas conseguidos mediante este procedimiento han entrado en la vía comercial. Sirven de dispositivo antifalsificación en tarjetas de crédito, documentos de seguridad, placas de identificación de empleados, pases de tránsito, etc. Por otra parte, como instrumento de publicidad, los hologramas aparecen en juguetes, tarjetas de felicitación y en cubiertas de libros o revistas.

Otra aplicación reciente del electroconformado nos la ofrece la obtención mediante esta técnica de partes vitales del prototipo de guía de ondas para el acelerador de partículas de doble haz. Este prototipo, conocido como HGS ("high-gradient test structure"), se obtiene por electrodeposición de una capa gruesa de cobre a partir de un electrólito ácido, aunque puede usarse también para esa electrodeposición un electrólito alcalinocianurado con iones cobre, como fue el caso de la obtención del prototipo de guía de ondas del acelerador de Stanford. El colimador lineal de electrones produce electrones con una enorme energía. Esta máquina posee una longitud comprendida entre dos y cuatro kilómetros; por sus características, complejidad y exquisito acoplamiento de las piezas, además de un sensible abaratamiento en su coste, requiere en su construcción la precisión de la técnica del electroconformado.

La fiel reproducción dimensional de cualquier tipo de superficie, por compleja que sea, permite pensar en un futuro espléndido para esta técnica en aquellos cometidos en que la copia exacta de la superficie de un objeto constituya el factor esencial de los mismos. Podrá, pues, aplicarse a la réplica de una obra escultórica de mayor o menor tamaño, que luego se recubrirá con la película metálica que se desee, y para la reproducción de cualquier pieza de precisión de uniforme solidez y con pequeñas tolerancias de medidas, tales como las requeridas en equipos de comunicación de alta tecnología, en aparatos de radar, en reflectores de medidas exactas o en mecanismos diversos de formas complicadas de máquinas o ingenios especiales. (Enrique Julve.)

Ciencia y empresa

¿Lo ve usted también?

La confirmación última de muchas enfermedades corresponde al patólogo, quien explora laboriosamente microfotografías de cortes de tejidos, en busca de células con colores, forma o disposición aberrantes. Los patólogos suelen consultar una segunda opinión autorizada antes de tomar una decisión delicada; esta consulta puede ser la parte más difícil del proceso médico. Se pueden perder preciosos días enviando microfotografías o muestras de tejidos a otros expertos.

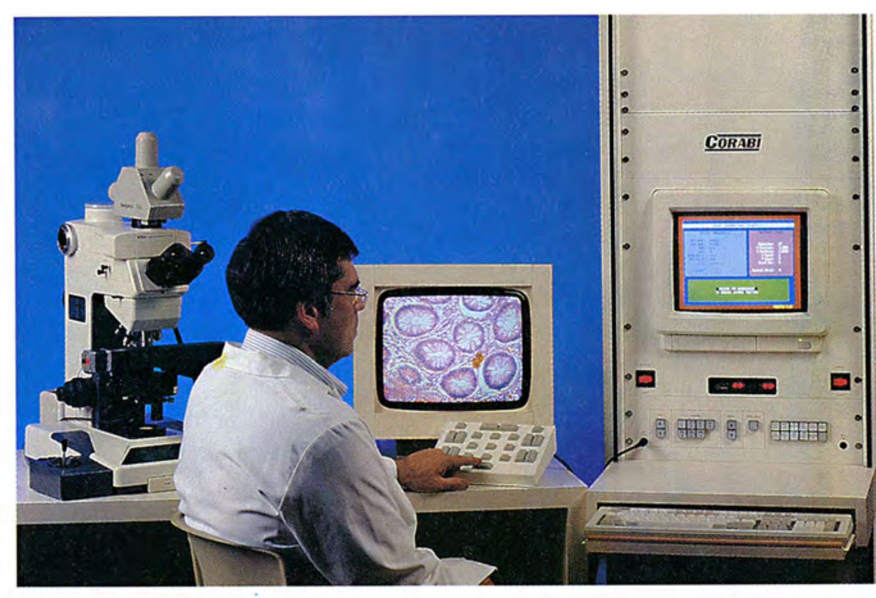
Las cosas podrían cambiar gracias a un nuevo enfoque. Los patólogos pueden ya examinar muestras de tejidos a cientos de kilómetros con el sistema de "telepatología", que combina un microscopio controlado por robot, soporte lógico apropiado y cámaras y monitores de televisión de alta definición (TVAD). Un primer equipo experimental instalado por la empresa Telemetrics, de Alexandria, conecta los departamentos de patología del Hospital Clínico de Emory con el Hospital Conmemorativo Grady de Atlanta. La red interactiva permite a los patólogos expertos en diferentes campos hacer diagnósticos provisionales o aportar una segunda opinión sin trasiego de muestras o médicos.

Cuando un patólogo pone un corte en la platina del microscopio, la imagen se transmite automáticamente. El receptor usa una plantilla para controlar el enfoque, posición e iluminación de la imagen ampliada en una pantalla de alta resolución. Las imágenes en tiempo real, que se envían por microonda de banda ancha en la instalación de Atlanta, se pueden manipular como si el patólogo receptor estuviera sentado directamente ante el microscopio transmisor. En una segunda instalación de telepatología en proyecto, que enlazará una red de 10 hospitales en el área de Washington, la imagen se enviará por cable de fibra óptica.

Si la telepatología fructifica, zonas remotas del mundo podrían disponer al instante de diagnósticos de primera clase. Así lo espera el creador del sistema, el patólogo Ronald S. Weinstein. Fundó Corabi, la empresa suministradora del equipo, en 1985, con su hermana, Beth W. Newburger, "para hacer el bien y hacerlo bien". Corabi se puso en contacto primero con cuatro grandes empresas y después con seis de tamaño mediano, todas las cuales trabajaban en algún videoproyecto. Weinstein y Newburger les explicaron las exigentes necesidades tecnológicas de los patólogos: reproducción fiel del color, alta resolución y posibilidad de mirar a distintas zonas de la imagen bajo iluminación y ampliación variable: y todo ello "en vivo". La reacción fue poco entusiasta. "Todo el mundo nos dijo que si conseguíamos que alguien nos lo construyera, tardaría un mínimo de cinco, tal vez ocho años antes de entregarlo", explica Newburger.

La pareja realizó una visita al Japón en 1986. Sin recomendaciones ni influencias, no lograron despertar el interés de nadie. Entonces COMSAT, empresa norteamericana de comunicaciones por satélite, concedió a Corabi una ayuda de 1,5 millones de dólares. COMSAT presentó su nuevo asociado a Sumitomo Electric, con la que comparte negocio en Japón. Corabi volvió al Japón en 1987 con una tarjeta de visita de Sumitomo; 32 compañías se adelantaron a hacerle la reverencia. El sistema se construyó en menos de dos años. Nikon se comprometió a fabricar un microscopio controlado por ordenador para Corabi en su primera visita. Del sistema de TVAD se encargó Ikegami Tushinki. A diferencia del monitor de alta calidad de Sony Corporation, el producto de Corabi no comprime los datos para dar una apariencia artificialmente bien definida. Los patólogos quieren que aparezcan los bordes irregulares de las células.

Con su primer proyecto en el mercado, Corabi puede sufrir la competencia de Du Pont, General Electric y Kodak, empresas que venden sistemas remotos de lectura de rayos X y otros datos de diagnóstico. Enfrentado a tan gigantescos competidores, Corabi tendrá que fiar en lo que les lleva de ventaja. Y por ahora el pronóstico es bueno. Robert R. Pascal, director de anatomía patológica de Emory, remacha: "Tenía que tener el toque de un patólogo para hacerlo tan fácil de usar".



1. EL SISTEMA DE TELEPATOLOGIA envía imágenes de alta resolución de muestras de tejidos desde un microscopio dotado de control remoto, haciendo posibles los diagnósticos a larga distancia.

Huyendo del frío

La frontera berlinesa entre Europa oriental y occidental evocaba de inmediato los rudimentos de dos modelos económicos antagónicos. Mas, después de tantos años de economía

centralizada, las leyes de la oferta y la demanda reinan ahora soberanas.

Los autobuses polacos forman colas kilométricas por la avenida de Berlín Occidental que conduce a la Puerta de Brandemburgo y al bloque oriental. Los jóvenes polacos salen en oleadas de la Kurfürstendamm, principal distrito comercial de Berlín, llevando cajas donde se lee "Aiwa" o "Casio". Hombres y mujeres arrastran carritos de la compra abarrotados de albaricoques en conserva y latas de zumo de naranja o cerveza. Se trata de la demanda inelástica en vivo: sin apenas comparar precios, compran lo que esperan revender en su país a precios todavía más altos.

El hambre de productos occidentales entraña un elemento de rechazo: pocos habitantes del Este compran productos orientales. En algunos casos, la superior calidad de los productos occidentales justifica los precios más altos. Los europeos orientales ya no están interesados en los Trabant, pequeños coches de dos tiempos. En otros casos, la caída de la demanda es menos lógica. El director de una comuna agrícola de Alemania oriental, a 50 kilómetros de Berlín, se queja de que no hay razón para enviar cerdos o ganado al matadero. Nadie comprará la carne. El dilema de la comuna, sin embargo, puede ser temporal. Este año acabarán las restricciones de exportación entre el Este y el Oeste, lo que permitirá a la cooperativa vender sus animales a mataderos occidentales.

Alemania Oriental está también luchando con la lección económica del beneficio marginal de las inversiones. ¿Producirá un "deutsche mark" invertido en renovar una vieja fábrica allí tanto beneficio para los inversores como el dinero gastado en ampliar una fábrica en Alemania occidental? Probablemente, no. En los países antaño socialistas las fábricas se caen de viejas, con su maquinaria renqueante y sus montones de desechos peligrosos. El aire de la zona industrial de Leipzig huele a quemado y azufre. La industria alemana oriental rompe todas las limitaciones anticontaminantes. Sólo limpiar las aguas subterráneas contaminadas puede costar al país unos 100.000 millones de marcos. Esta cifra podría duplicarse si el gobierno pretende que las centrales térmicas cumplan las normas ambientales del Oeste.

Será difícil recabar fondos para reconstruir la infraestructura industrial. Hay pocos alicientes hoy para atraer capital occidental. Las viejas factorías acarrean una pesada carga ambiental y emplean una fuerza laboral desproporcionada. La alimentación y la vivienda, que estaban subvencionadas, subirán probablemente al triple de su precio actual cuando el gobierno retire su ayuda del mercado libre. Los productores occidentales podrían decidir servir al Este desde sus fábricas establecidas en Alemania occidental.

Algunos occidentales, no obstante,

hablan con esperanza de las "fuerzas del mercado" que, con el tiempo, obligarán a los salarios y precios del Este a alcanzar un adecuado equilibrio. Otros temen con razón que habrán de pagar —mediante impuestos más altos e inflación— para mantener a sus parientes pobres. Junto con la inundación de nuevos productos, los orientales se enfrentan a la posible desaparición de su sistema de seguridad social y a la probabilidad de que el desempleo caiga sobre cuatro millones de ellos en la estela de la reunificación.

Las economías de planificación central han sucumbido con la ideología socialista. Pero puede pasar tiempo antes de que el brusco cambio hacia el capitalismo en Alemania oriental comience a mejorar el nivel de vida sus habitantes.

Cristales sensibles al sonido

En *La guerra de las galaxias* y otras películas de fantasía científica, los hologramas remedan la vida, con imágenes en movimiento que aparecen en pantallas de ordenador y videoteléfonos futuristas. La verdad es que la mayoría de los hologramas son dibujos borrosos y estáticos que sólo tienen un ligero aspecto tridimensional. Más en serio, los investigadores del laboratorio de medios del Instituto de Tecnología de Massachusetts están consiguiendo los efectos especiales holliwoodianos: han producido hologramas animados y generados por ordenador.

Una secuencia de demostración preparada por los expertos muestra el buque espacial *Enterprise*, de la serie televisiva *Viaje a las estrellas*, en órbita alrededor de un planeta. Otros sistemas más avanzados podrían servir de representaciones tridimensionales en las consolas de trabajo y otras estaciones. Los controladores de tráfico aéreo, por ejemplo, podrían ver las posiciones reales de los aviones en las concurridas aerovías. Los médicos podrían basar su diagnóstico en imágenes tridimensionales de órganos exploradas por tomografía informatizada, en vez de apoyarse en imágenes planas de cortes.

Los hologramas que Stephen A. Benton, Pierre St. Hilaire, Mark Lucente y sus colaboradores han producido hasta ahora son pequeños —de unos cuatro centímetros por lado— y parecen flotar ante la lente de la cámara de 35 milímetros que enfoca la imagen. Las imágenes muestran paralaje: cuando la cabeza del observador se mueve hacia la izquierda o la derecha, aparecen diferentes partes de la imagen. El holograma en movimiento está animado a una velocidad de 15 a 20 tomas por segundo, comparable con la calidad de algunos dibujos que se ofrecen en televisión.

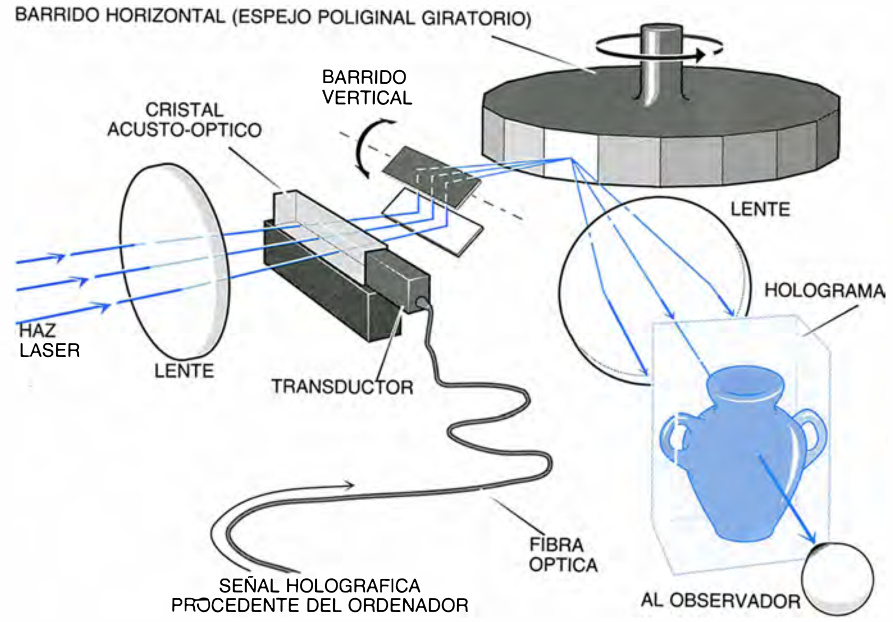
Pero convertir datos de ordenador en hologramas no es tarea fácil. Los hologramas se hacen, en general, fotográficamente, registrando en película las interacciones entre un haz láser y su reflexión en un objeto. Aunque el ordenador calcula la manifestación del holograma desde diferentes ángulos, cuesta transformar la información en imagen visible. Benton y sus colaboradores lo han logrado convirtiendo primero los datos del ordenador en sonido y, después, en luz. La clave de su éxito yace en el cristal acústico-óptico, que responde a los sonidos desviando la luz en diferentes direcciones.

En el sistema del MIT, se expone simultáneamente un cristal al haz láser y a las ondas sonoras que transportan la descripción informatizada del holograma. El cristal refracta el haz láser de suerte que, en cada instante, el haz toma la apariencia de una parte diferente del holograma. Unos espejos organizan entonces el haz convirtiéndolo en una imagen en reposo. Alterando ligeramente la imagen 20 veces por segundo, el grupo de Benton crea la ilusión de una imagen en movimiento.

La generación de un holograma exige una potente capacidad de cálculo. Para mantener el sistema prototipo dentro de límites razonables, el grupo del MIT hace sus hologramas pequeños, estrechando el ángulo bajo el cual se ve y eliminando la paralaje vertical. Aun así, se necesitan dos millones de bytes para crear una sola imagen holográfica estática. La mayoría de los ordenadores tardan horas o días en realizar los cálculos necesarios. El propio superordenador del MIT invierte unos cinco segundos.

A esa velocidad, el sistema peca de lentitud excesiva —debería ser cien veces más veloz al menos— para crear nuevas imágenes con la celeridad requerida por la representación del movimiento en tiempo real. Para presentar el *Enterprise* en acción, los investigadores deben hacer todos los cálculos por adelantado y almacenar los resultados. El ordenador sólo puede almacenar la información correspondiente a 50 imágenes estáticas, razón por la cual la secuencia del holograma móvil dura sólo unos segundos.

Dentro de 10 años, aventura Lucente, la tecnología puede haber avanzado lo suficiente para que se puedan presentar imágenes holográficas en máquinas comerciales. Hay ordenadores de proceso en paralelo de un millón de dólares que podrían hacer el trabajo ahora, señala. Pero, añade lo que podría servir de divisa del Laboratorio de Medios: "Sólo estamos inventando el futuro, no pronosticándolo."



2. CREACION DE HOLOGRAMAS EN MOVIMIENTO mediante ordenador en el laboratorio de medios del MIT. Un haz de láser y datos convertidos en ondas sonoras atraviesan un cristal. La luz emergente se ordena mediante espejos, convirtiéndose en una imagen tridimensional que cambia rápidamente.

La Dorsal Centro-oceánica

Es la cadena montañosa más larga, el área volcánica más activa y, hasta hace poco, la región menos accesible de la Tierra. La cartografía revela datos impresionantes de la formación y desarrollo de los segmentos de la dorsal

Kenneth C. Macdonald y Paul J. Fox

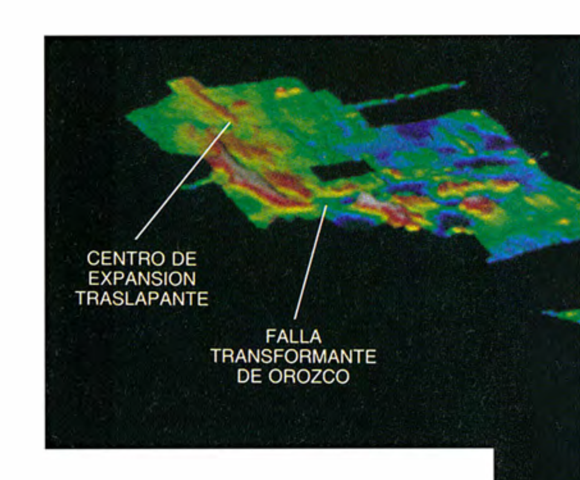
El día 8 de julio de 1982 nos embarcamos en el buque oceanográfico *Thomas Washington* para estudiar la Cordillera submarina del Pacífico Oriental, una cadena volcánica de montañas que yace bajo el Océano Pacífico. Ese macizo submarino se integra en la Dorsal Centro-oceánica, de 75.000 kilómetros de longitud. Similar a las costuras de una pelota de frontón, la dorsal recorre el globo desde el Artico hasta el Atlántico, bordeando Africa, Asia y Australia; por el Pacífico se prolonga hacia las costas orientales de América del Norte. Aunque la dorsal es, con mucho, la estructura más extensa del planeta, conocemos peor sus rasgos morfológicos que los de los cráteres de la cara oculta de la Luna.

Nuestros colegas de la Institución Scripps de Oceanografía acababan de equipar el *Thomas Washington* con un nuevo tipo de sistema de sonar, construido por la empresa General Instrument. El "Haz marino", con ese nombre se le bautizó, podía cartografiar un corte de dos kilómetros de suelo oceánico en un solo barrido. Todos esperábamos que lograra revelar la topografía submarina con un detalle sin precedentes y aportara nuevas luces sobre las fuerzas que originan y dan forma a la Dorsal Centro-oceánica.

Tras navegar con rumbo sureste unos 2500 kilómetros, desde el muelle de la Institución Scripps en San Diego, intersecamos la cresta de la Cordillera submarina del Pacífico Oriental, que yace a una profundidad aproximada de 2,5 kilómetros. Esa eminencia submarina marca la frontera entre la placa del Pacífico y la de Cocos; las placas tectónicas son bloques de la corteza y el manto superior de la Tierra. Las placas se van separando a razón de 120 milímetros por año (el doble de la razón de crecimiento de la uña de un dedo de la mano). Conforme las placas se alejan, van abriéndose fisuras a lo largo de la cresta de esa eminencia, dejando que se filtre roca derretida procedente del manto. Parte de la misma se derrama sobre el suelo marino en erupciones tremendas. El magma se solidifica entonces y forma, cada año, muchos kilómetros cuadrados de nueva corteza oceánica. A escasos kilómetros por encima del foco de actividad, nos sentíamos como liliputienses que se arrastraran por el lomo de un gigante dormido, capaz de despertarse en cualquier momento.

Mientras el Haz estudiaba la joroba del gigante, observábamos las imágenes del paisaje marino que nos ofrecían las pantallas instaladas a bordo del *Thomas Washington*. Aparecían rasgos familiares: el terreno elevado que define el eje de la dorsal y grandes discontinuidades, llamadas fallas de transformación, que desplazan segmentos de la dorsal a cientos de kilómetros de distancia. Pero vimos también, y de ello fue testigo presencial Peter F. Lonsdale, de Scripps, otras estructuras desconocidas: segmentos que se doblaban, dorsales que se traslapaban y corteza oceánica que se retorcía y distorsionaba en sus proximidades.

Desde principios de los años ochenta, nuestros colegas de Francia, Inglaterra y Estados Unidos habían examinado varias secciones de la Cordillera submarina del Pacífico Oriental y otras partes de la Dorsal Centro-oceánica. Por cuyas investigaciones sabemos que la dorsal presenta discontinuidades laterales que fragmentan su eje en segmentos. Aunque las discontinuidades difieren en forma y comportamiento, muchas de ellas son más profundas y con menor actividad volcánica que los segmentos que definen. Ese es el motivo de que la cresta de la dorsal se ondule, arriba y abajo, centenares de metros en distancias que van desde 10 hasta 1000 kilómetros. Con los años, hemos llegado a entender la evolución de tales discontinuidades y esos segmentos y su relación con los procesos que se producen en las profundidades de la corteza y el manto terrestre.



Expansión del suelo marino

Bruce C. Heezen, oceanógrafo norteamericano, acertó cuando describió la Dorsal Centro-oceánica como "la herida que nunca cicatriza". En 1956, advirtió con W. Maurice Ewing que los terremotos de la cuenca oceánica definían un cinturón continuo que circunvalaba el mundo. Por coincidir el cinturón con partes de la dorsal que se conocían en esa época, propusieron que la Tierra estaba rodeada por un sistema continuo de

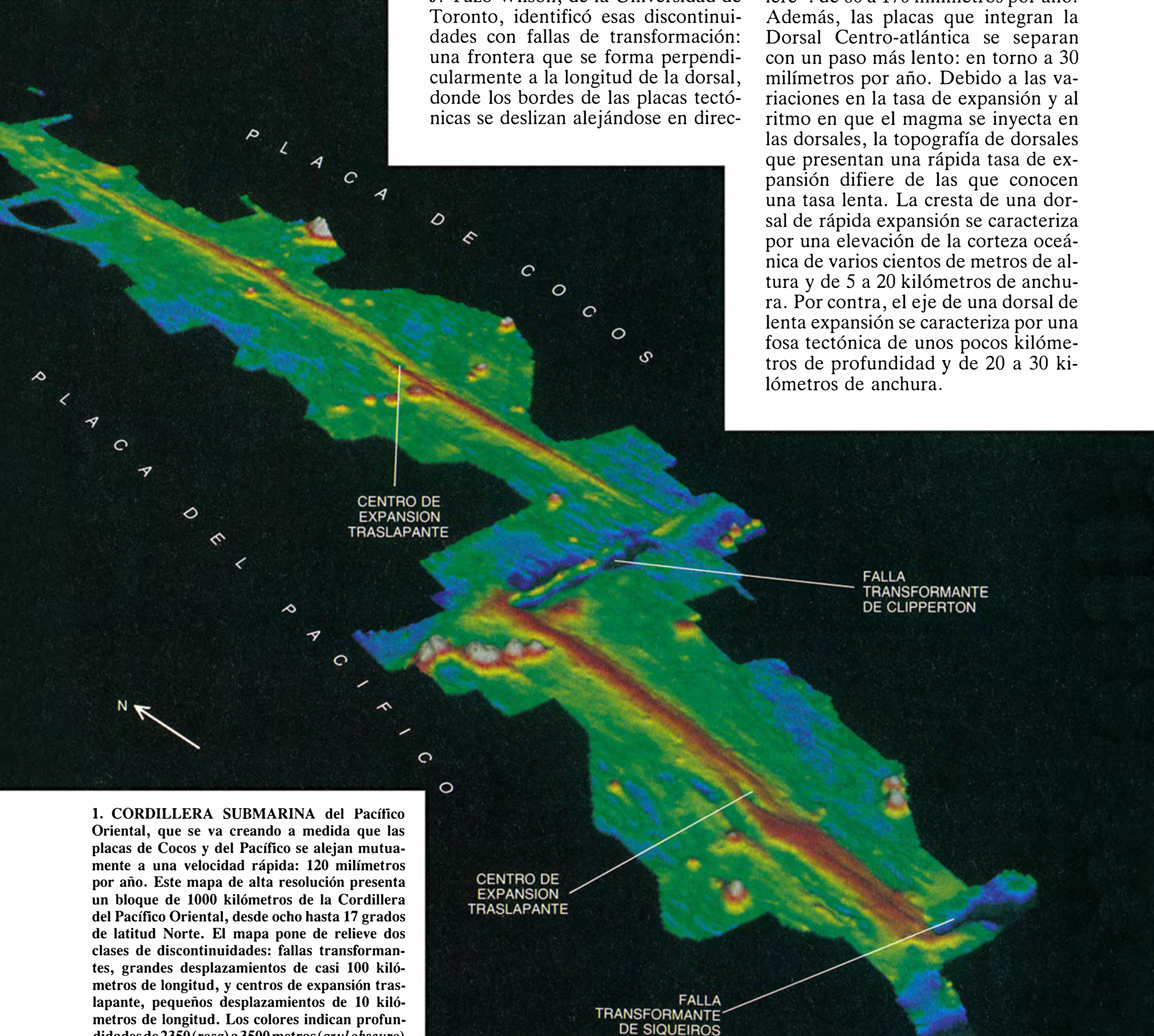
KENNETH C. MACDONALD y PAUL J. FOX han colaborado en muchas expediciones a la Cordillera submarina del Pacífico Oriental y a la Dorsal Centro-atlántica. Macdonald enseña geofísica marina en la Universidad de California en Santa Bárbara. En 1975 se doctoró en geofísica marina por el Instituto de Tecnología de Massachusetts y por la Institución Oceanográfica Woods Hole. Fox es profesor de oceanografía en la Universidad de Rhode Island. En 1972 recibió el doctorado en geofísica marina por la Universidad de Columbia.

dorsales oceánicas. Desde su mismo descubrimiento, oceanógrafos y geólogos se aprestaron a conseguir una visión más inmediata de la Dorsal Centro-oceánica que les permitiera entender sus orígenes.

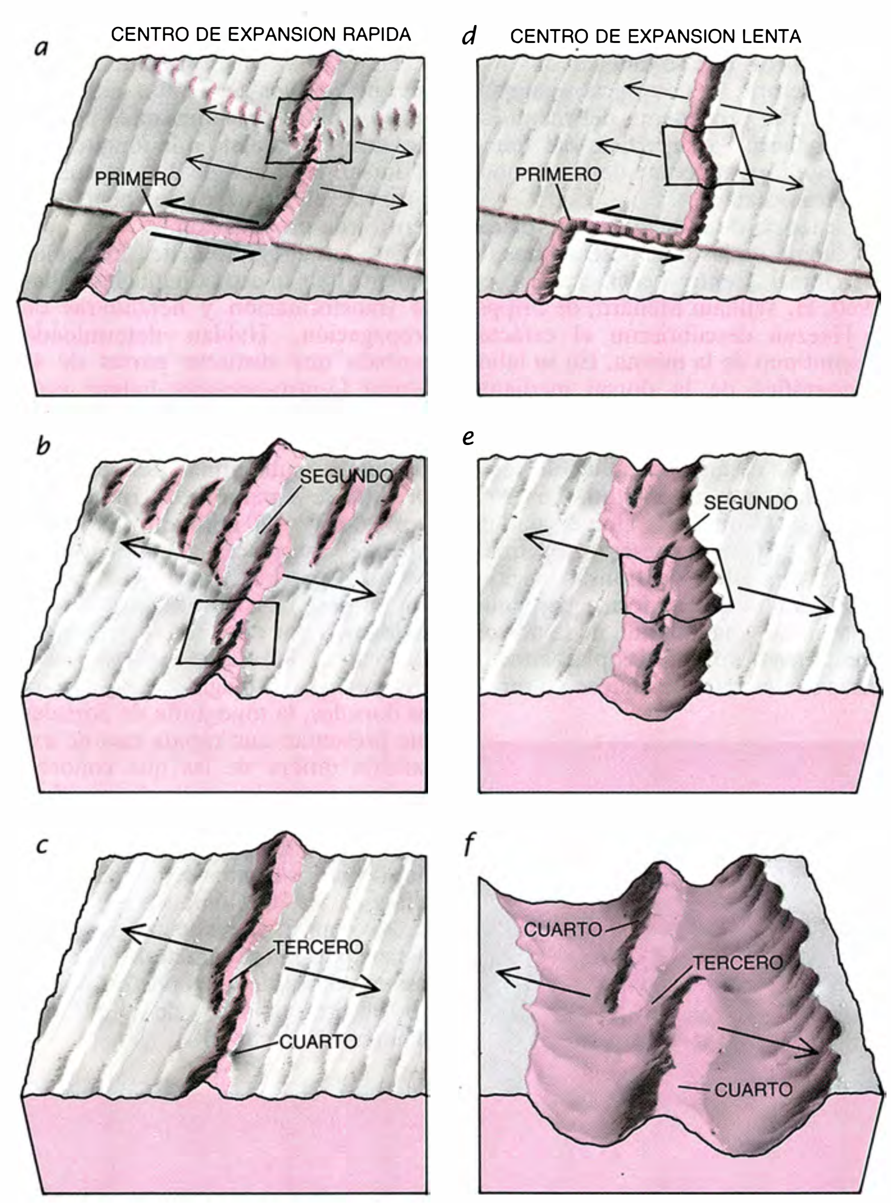
Mas, hasta 1960, no se conocieron los procesos geológicos globales que generan y dan forma a la dorsal. Harry H. Hess, de la Universidad de Princeton, introdujo entonces el concepto de expansión del suelo marino. Otros estudiosos refinaron y desarrollaron la idea en el marco de la teoría de la tectónica de placas. La teoría postula que la corteza y el manto superior están divididos en unas docenas de placas, como la del Pacífico y la de Cocos, que se mueven una respecto de otra. Si dos placas se alejan, el material procedente del manto se infiltra hacia la superficie del fondo marino, formando una dorsal y nueva corteza oceánica.

La teoría de la tectónica de placas da cuenta de las macroestructuras de la Dorsal Centro-oceánica. Ya en 1960, H. William Menard, de Sripps, y Heezen descubrieron el carácter discontinuo de la misma. En su labor cartográfica de la dorsal mediante equipos de sondeo, hallaron muchos lugares donde existían desplazamientos de aquélla en ángulo recto con relación a su longitud. En 1965, J. Tuzo Wilson, de la Universidad de Toronto, identificó esas discontinuidades con fallas de transformación: una frontera que se forma perpendicularmente a la longitud de la dorsal, donde los bordes de las placas tectónicas se deslizan alejándose en direcciones opuestas. Más tarde, Richard N. Hey, de la Universidad de Hawai, advirtió que los segmentos definidos por dos fallas transformantes podían moverse en paralelo a la longitud de la dorsal. Este tipo de discontinuidad recibiría el nombre de hendidura ("rift") de propagación.

Los oceanógrafos de los años ochenta habían acotado muchas fallas de transformación y hendiduras de propagación. Habían determinado también que distintas partes de la Dorsal Centro-oceánica habían evolucionado a ritmos diferentes. Por otro lado, las placas que forman la Cordillera submarina del Pacífico Oriental se separan a un ritmo "célere": de 60 a 170 milímetros por año. Además, las placas que integran la Dorsal Centro-atlántica se separan con un paso más lento: en torno a 30 milímetros por año. Debido a las variaciones en la tasa de expansión y al ritmo en que el magma se inyecta en las dorsales, la topografía de dorsales que presentan una rápida tasa de expansión difiere de las que conocen una tasa lenta. La cresta de una dorsal de rápida expansión se caracteriza por una elevación de la corteza oceánica de varios cientos de metros de altura y de 5 a 20 kilómetros de anchura. Por contra, el eje de una dorsal de lenta expansión se caracteriza por una fosa tectónica de unos pocos kilómetros de profundidad y de 20 a 30 kilómetros de anchura.



1. CORDILLERA SUBMARINA del Pacífico Oriental, que se va creando a medida que las placas de Cocos y del Pacífico se alejan mutuamente a una velocidad rápida: 120 milímetros por año. Este mapa de alta resolución presenta un bloque de 1000 kilómetros de la Cordillera del Pacífico Oriental, desde ocho hasta 17 grados de latitud Norte. El mapa pone de relieve dos clases de discontinuidades: fallas transformantes, grandes desplazamientos de casi 100 kilómetros de longitud, y centros de expansión traslapante, pequeños desplazamientos de 10 kilómetros de longitud. Los colores indican profundidades de 2350 (*rosa*) a 3500 metros (*azul obscuro*).



2. DISCONTINUIDADES DE LA DORSAL CENTRO-OCEANICA y su clasificación de acuerdo con su forma, tamaño y longevidad. En un centro de expansión rápida, pensemos en la Cordillera submarina del Pacífico Oriental, una discontinuidad de primer orden (*a*) es una falla transformante, donde las placas rígidas se deslizan una sobre otra. La falla desplaza a la dorsal unos 50 kilómetros, por lo menos. Una discontinuidad de segundo orden (*b*) suele ser un gran centro de expansión traslapante que desplaza a la dorsal en al menos dos kilómetros. La discontinuidad de tercer orden (*c*) es un pequeño centro de expansión traslapante que desplaza a la dorsal entre 0,5 y dos kilómetros. La discontinuidad de cuarto orden (*c*) se caracteriza por ligeras desviaciones de su linealidad axial. Para un centro de expansión lenta, así el de la Dorsal Centro-atlántica, una discontinuidad de primer orden (*d*) es también una falla transformante, pero supone una ruptura en una fosa oceánica, y no en una cresta de la dorsal. En la discontinuidad de segundo orden (*e*) hallamos un doblamiento, o saliente, en la fosa oceánica. Llamamos discontinuidad de tercer orden (*f*) al hiato entre cadenas de volcanes; discontinuidad de cuarto orden (*f*), al hiato producido en el seno de una cadena volcánica. Las estructuras de primer y segundo orden suelen hallarse flanqueadas por corteza distorsionada que se ha formado con el avance de la discontinuidad. Se sabe que estas estructuras son más antiguas que las discontinuidades de tercer y cuarto orden porque la corteza oceánica de la proximidad de las estructuras de orden superior no muestra señales de que haya sufrido distorsión alguna.

A principios de la década de los ochenta, basándose en las observaciones de la Dorsal Centro-atlántica, Hans Schouten, de la Institución Woods Hole de Oceanografía, Kim D. Klitgord, del Servicio Geológico de los Estados Unidos, y sus colaboradores avanzaron la hipótesis según la cual las fallas de transformación dividían la Dorsal Centro-oceánica en segmentos que mostrarían un comportamiento singularizado. Cada segmento de expansión, sugerían, se hallaba conectado a una fuente que hundía su origen en el manto. A tenor de sus datos, cada segmento medía unos 50 kilómetros de longitud; en razón de ellos también, las regiones originadoras y sus segmentos dorsales asociados permanecían inalterados durante decenas de millones de años.

Cuando Lonsdale y nosotros cartografiamos grandes porciones del eje de la Cordillera submarina del Pacífico Oriental, en 1982, esperábamos que esa eminencia fuera una estructura más o menos continua, puesto que sólo se habían descubierto nueve fallas transformantes, muy distanciadas, en sus 5000 kilómetros de longitud. Para sorpresa nuestra, el eje de la cordillera se interrumpía, con frecuencia, por muchos cortes pequeños (se han cartografiado más de 40 hasta el día de hoy). Tales discontinuidades fragmentaban la dorsal en segmentos cuya longitud variaba de 10 a 200 kilómetros. A diferencia de las fallas de transformación, las zonas de corte se caracterizaban por la superposición de remates o vertederos magmáticos de la dorsal; no parecía unir, unos remates con otros, ninguna falla [*véase la figura 2*]. Desde su descubrimiento, hemos cartografiado las regiones externas al eje que circundan a esos remates traslapantes y, al hacerlo, nos hemos encontrado con que manifiestan una evolución rápida. Y hemos hallado que las discontinuidades pueden viajar a lo largo de la dorsal, a velocidades variables y en direcciones diferentes. Los segmentos individuales limitados por esas discontinuidades pueden, en apariencia, prolongarse o acortarse. Mapas de alta resolución atestiguan, por su lado, la existencia de discontinuidades no rígidas similares en la Dorsal Centro-atlántica, de lenta propagación.

Modelo de aportación de magma

Para determinar el origen de estas discontinuidades, nosotros, lo mismo que nuestros colegas, nos hemos esforzado por descubrir lazos entre la segmentación y la actividad volcánica. Aunque el vulcanismo puede cambiar mucho de un segmento al siguiente, varía de manera sistemática a lo largo de la longitud de cada segmento. Las regiones menos activas son discontinuidades profundas, mientras que las más activas constituyen centros someros de segmentos [véase "La corteza oceánica", por Jean Francheteau; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 1983].

A partir de estas y otras observaciones, nosotros, Schouten y nuestros colegas hemos ideado un modelo de segmentación de la dorsal mediante suministro de magma. En el manto, a

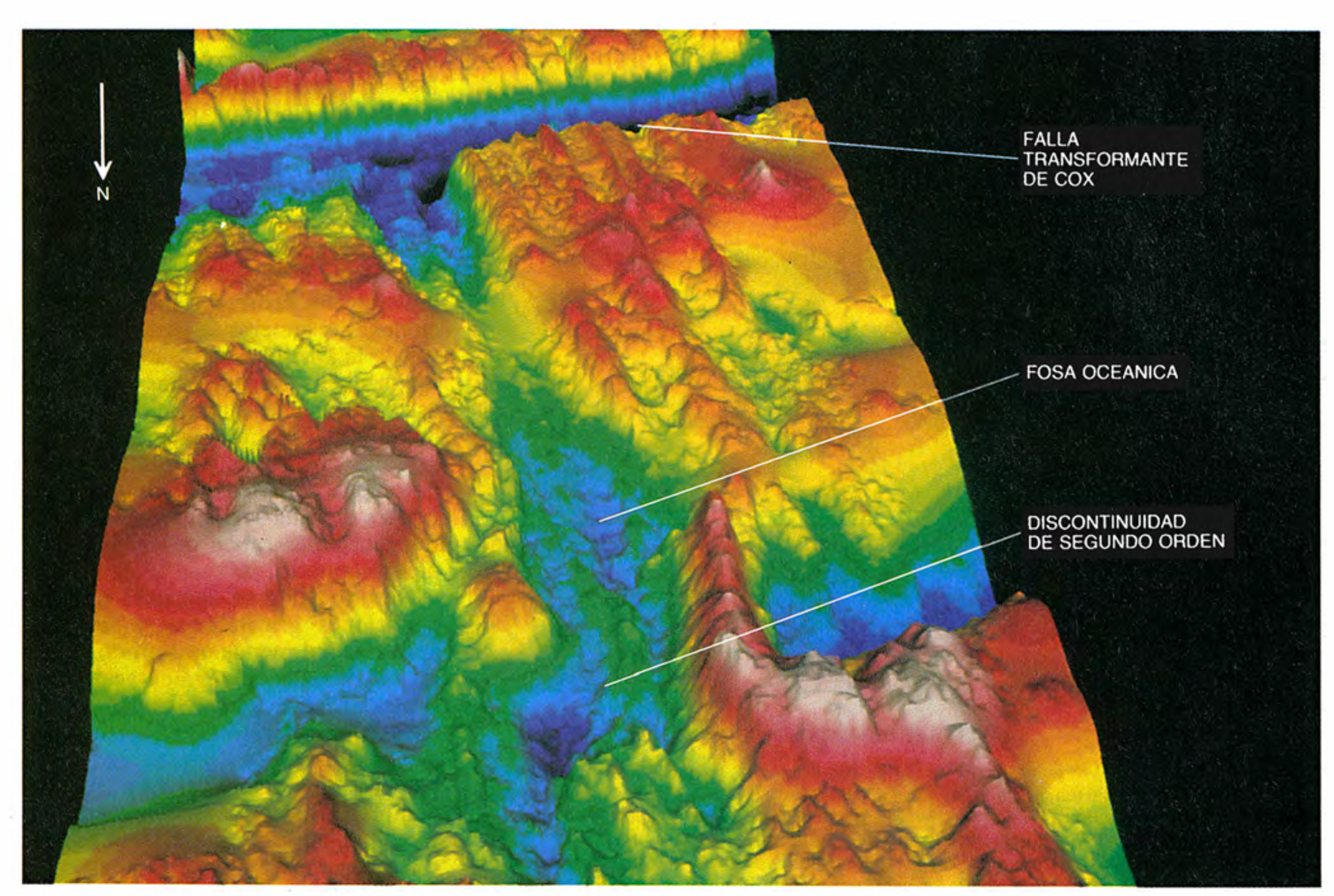
una profundidad de 30 a 60 kilómetros, las rocas se calientan hasta altas temperaturas; ahora bien, por culpa de las elevadas presiones a que suelen hallarse sometidas, permanecen en estado solido. El ambiente difiere algo en la frontera entre placas tectónicas. Conforme las placas se separan, se relaja la presión que sufren algunas rocas y se funden. La roca fundida se infiltra entonces a través del manto y ocupa una cámara somera de la corteza, que yace bajo la cresta de la dorsal. A medida que la cámara se va llenando de magma y comienza a expandirse, la fuerza de Arquímedes, ejercida por la roca fundida en la cámara magmática y por la región más extensa de roca caliente del manto superior, empuja la cresta de la dorsal hacia arriba [*véase la figura 4*].

De acuerdo con el modelo de segmentación con suministro de magma, cuanto mayor sea la aportación de roca caliente y fundida a una región, más se elevará el segmento suprayacente de la dorsal. Más aún, la tasa y volumen de suministro de roca fundida puede cambiar de una región a otra, creando variaciones en la morfología de los diferentes segmentos suprayacentes.

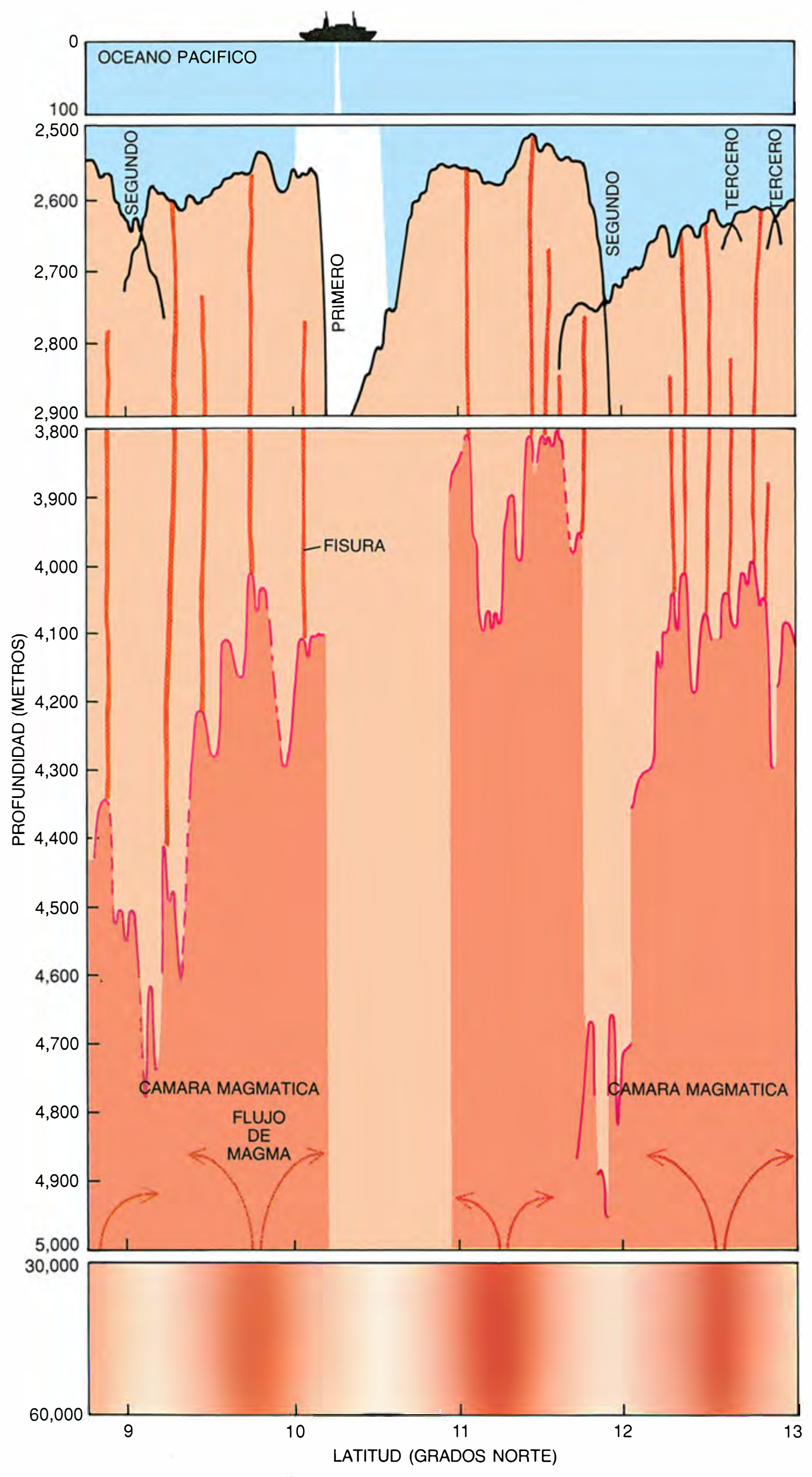
En el marco del modelo magmático se explican también las variaciones estructurales pequeñas. Conforme el magma que hay en las cámaras avanza lateralmente, a lo largo del eje de la dorsal, la corteza suprayacente, delgada y frágil, se estira y fractura. El magma puede hacer erupción a través de esas rendijas y expandirse por el suelo marino. A medida que las rajas se van abriendo, aparecen las erupciones volcánicas. Las erupciones continuarán hasta que remita la producción de magma y se acabe su suministro. Las variaciones temporales en la liberación de roca fundida afecta la evolución de un segmento: cuando un segmento está bien alimentado de roca derretida, en comparación con sus vecinos, tiende a alargarse; en caso contrario, el segmento se acorta. Esta expansión y contracción del sistema de suministro de magma, en respuesta a la separación de la placa, desencadena el crecimiento o acortamiento de los segmentos y el movimiento de pequeñas discontinuidades.

El modelo de suministro de magma se muestra coherente, así parece, con las medidas de gravedad y de sismicidad realizadas en la Cordillera submarina del Pacífico Oriental. Las mediciones sísmicas revelan que existe un buen reflector de energía sónica alrededor de 1,2 a 2,5 kilómetros por debajo de las porciones someras de cada segmento dorsal. Este reflector se hunde a menudo para luego desaparecer cerca de las discontinuidades. En 1987, Robert S. Detrick y sus colaboradores, de la Universidad de Rhode Island, situaron el reflector en el techo de la cámara magmática. La intensidad de la reflexión del sonido se atribuye a una delgada capa fundida, casi en un 100 por ciento, que hay a lo largo de la parte superior de la cámara.

Geólogos y oceanógrafos, en su mayoría, están hoy de acuerdo en que el reflector es un cuerpo magmático largo y somero, situado bajo la dorsal y rodeado de roca caliente. John A. Orcutt y sus colaboradores, de Scripps, han realizado medidas sísmicas en la parte norte de la Cordillera submarina del Pacífico Oriental



3. EMERGE LA DORSAL CENTRO-ATLANTICA a medida que las placas Sudamericana y Africana se van separando a una velocidad "lenta" de 30 milímetros por año. El eje de la dorsal está definido por una fosa océanica de dos kilómetros de profundidad, típica de muchos centros de expansión lenta. El mapa muestra un salto de 12 kilometros de la fosa oceánica, una discontinuidad de segundo orden; ofrece también una discontinuidad de primer orden: la falla transformante de Cox. Los colores indican profundidades de 1900 metros (*rosa*) a 4200 metros (*azul obscuro*).



4. AFLORACION DE MAGMA desde las profundidades del manto, para crear la Cordillera submarina del Pacífico Oriental (en sección transversal a lo largo de la cresta de la dorsal). Los científicos suponen que la roca parcialmente derretida que se encuentra entre 30.000 y 60.000 metros de profundidad percola hacia arriba y se produce en grandes cantidades en algunas áreas (*rojo obscuro*) más que en otras (*rojo claro*). Afirman que la roca fundida llena y expande las cámaras magmáticas. Las mediciones sísmicas abonan la hipótesis según la cual los techos de las cámaras se hallarían a la profundidad indicada por la línea roja discontinua. La roca fundida ascendería desde la cámara a través de grietas abiertas en la corteza y entonces se solidificaría o afloraría sobre el suelo marino. La profundidad de la dorsal (*línea negra superior*) se determinó con las mediciones realizadas por sonar. La cámara magmática se rasga bajo las discontinuidades de orden uno, dos y a veces tres.

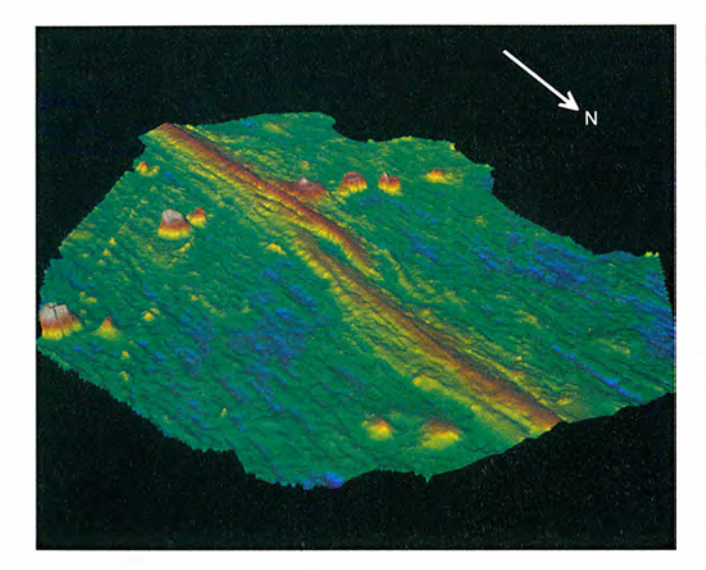
y sostienen que esa cámara mide de dos a cuatro kilómetros de anchura, con un grosor de menos de un kilómetro. La cámara magmática está rodeada por una región más ancha, de roca muy caliente (quizá ligeramente derretida). El depósito podría medir de seis a 10 kilómetros de ancho y de tres a seis de espesor. Esta región de roca caliente se extiende hasta la base de la corteza oceánica y, probablemente, se hunde algunos kilómetros manto superior adentro.

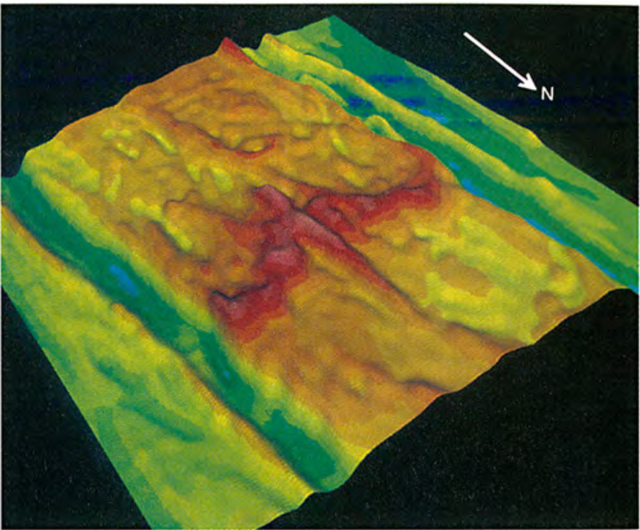
Cámaras magmáticas

La presencia de cámaras magmáticas y de depósitos de roca caliente se ha apoyado en mediciones precisas del campo gravitatorio del lugar; esos datos abonan la existencia de una masa flotante bajo el eje de la dorsal. A partir de ambas mediciones, gravitatoria y sísmica, los investigadores han deducido que la cámara magmática se asemeja a un hongo en sección transversal: posee un estrecho talo parcialmente derretido que alimenta un sombrerillo ancho y muy delgado, completamente fundido.

Las pruebas sísmicas no han demostrado taxativamente que existan cámaras magmáticas allende las formaciones de lenta expansión, como la Dorsal Centro-atlántica. Otras mediciones, sin embargo, parecen apoyar un modelo de suministro de magma para dorsales de expansión lenta. Donald W. Forsyth y Ban-Yuen Kuo, de la Universidad de Brown, y Jian Lin y G. Michael Purdy, de Woods Hole, descubrieron anomalías en el campo gravitatorio, centradas sobre las porciones más someras de varios segmentos de la Dorsal Centro-atlántica. La mejor explicación de estas anomalías es la que apela a una afloración de material del manto caliente o un engrosamiento de la corteza oceánica que subyace bajo las porciones superficiales de cada segmento. Ambas interpretaciones caben dentro del modelo propuesto.

Resultó un gran consuelo que las mediciones gravitatorias y sísmicas apoyaran, al menos en sentido general, el modelo de segmentación con suministro de magma. Nosotros y muchos otros especialistas en tectónica y geoquímica hemos puesto en juego nuestro prestigio durante mucho tiempo con esa hipótesis. Para ser sinceros, algunos nos imaginábamos una cámara mayor; y aún está por ver si el magma fluye de verdad lateralmente bajo el eje de la dorsal. Ello no obstante, se han encontrado pruebas sólidas que respaldan el modelo.





5. CENTRO DE EXPANSION TRASLAPANTE que corta la Cordillera submarina del Pacífico Oriental cerca de los 12 grados de latitud Norte. Se exploró con el fin de determinar su topografía (*izquierda*) y magnetización (*derecha*). El mapa topográfico muestra que el centro de expansión traslapante provoca la deriva de la Cordillera en ocho kilómetros. Los colores indican profundidades de 2350 metros (*rosa*) a 3500 metros (*azul obscuro*). Los dos brazos de la discontinuidad coinciden a lo largo de 27 kilómetros. Los brazos se estrechan y se tornan más profundos cerca de la discontinuidad, por la presumible razón de que el suministro de magma hacia la región es pobre. El suelo marino del entorno de la discontinuidad (también conocido por estela) alcanza una profundidad insólita y recibe los vertidos de la dorsal, especialmente en su lado oeste. Se observa que las regiones que carecen de un buen suministro de magma poseen un elevado grado de magnetización. En el mapa de la derecha, la magnetización decrece en fuerza desde el rojo hacia el amarillo. El mapa muestra la estela (*roja*) del centro de expansión traslapante. Las fosas verdeazuladas se crearon hace 700.000 años, cuando el campo magnético tenía una polaridad inversa. La estela muestra que los centros de expansión traslapante emergieron hace unos 700.000 años, viajaron hacia el norte un breve trecho, para encaminarse luego, lentamente hacia el sur, a una velocidad de 70 milímetros por año. En los últimos 200.000 años, el movimiento meridional procedió a un ritmo anual de 200 milímetros. (Dibujos de Laura Perram.)

El modelo de suministro de magma ha acertado de pleno en su justificación de los diferentes tipos de discontinuidades y segmentos. Tales estructuras se agrupan en cuatro órdenes (primero, segundo, tercero y cuarto) de acuerdo con su tamaño, longevidad, geometría y comportamiento. Se ha demostrado que las estructuras de primer, segundo y tercer orden son componentes fundamentales de las dorsales de expansión lenta y rápida. (Seguimos sin conocer la misión de las de cuarto orden.) Porque se ha investigado con cierto pormenor sobre dorsales de rápida expansión, comenzaremos por ellas.

Discontinuidades

El tipo más común de discontinuidad de primer orden es la falla de transformación. Aparece allí donde las placas rígidas se deslizan una sobre otra. Las discontinuidades de primer orden desplazan los segmentos dorsales al menos a 20 kilómetros y, habitualmente, a más de 50 kilómetros. De ahí que muchas fallas transformantes alcanzaran magnitud suficiente para que se detectaran en los primeros trabajos de reconocimiento cartográfico. Estas discontinuidades definen, de manera característica, segmentos de 200 a 800 kilómetros de longitud.

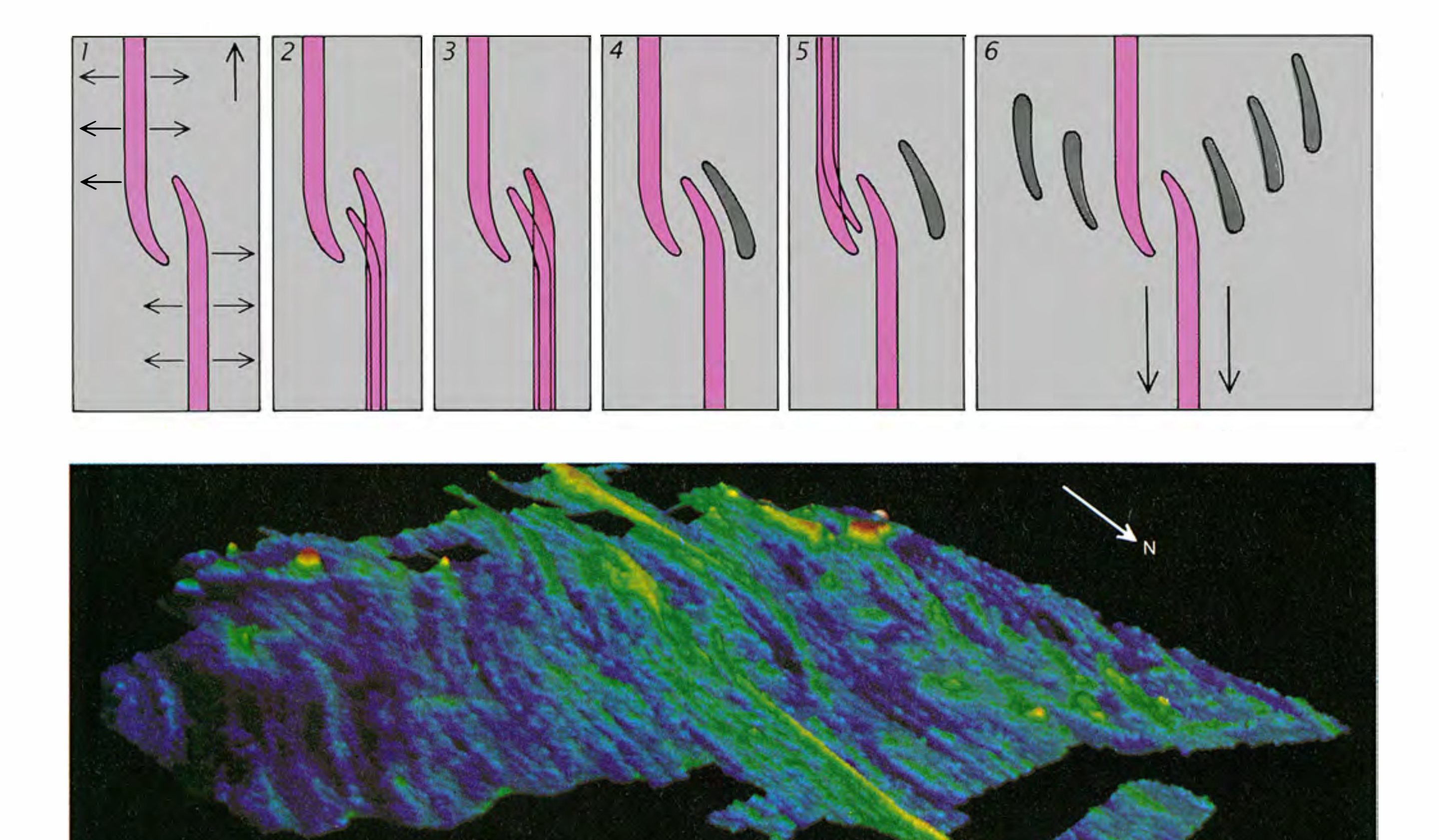
En el suelo marino, las fallas transformantes se manifiestan en bandas estrechas y rectas que hilvanan los extremos de los segmentos. Las bandas pueden seguirse en los flancos de una dorsal, por cientos o miles de kilómetros [*véase la figura 1*]. Tales trazas indican que las estructuras de primer orden persisten durante millones o decenas de millones de años.

Un segmento de primer orden puede fragmentarse por varias discontinuidades de segundo orden, espaciadas por lo común en intervalos de 50 a 300 kilómetros. A diferencia de las estructuras de primer orden, sin embargo, los segmentos de segundo orden ni son rígidos, ni su movimiento se concentra a lo largo de una estrecha zona de falla. Las discontinuidades de segundo orden son rasgos complejos, caracterizados por estructuras oblicuas que se traslapan.

Estas discontinuidades recuerdan de cerca los brazos de dos personas que se aprestan a estrecharse la mano. Los brazos (dorsales) se extienden de suerte que las manos (los extremos curvos de las dorsales) se superponen. La distancia entre las "manos" oscila de uno a 20 kilómetros. El desplazamiento es tres veces más corto que la longitud del solapamiento de las dorsales. Se ha dado en llamar, a esos rasgos, centros de expansión solapadora [*véase la figura 5*].

Cuando se descubrieron, en 1982, los centros de expansión traslapantes, nos sentíamos incapaces de explicar muchas de sus características. ¿Por qué muchos de esos centros tenían una razón de solapamiento a desviación de 3 a 1? Que sucedía con la corteza que yacía entre las dorsales traslapantes? ¿Por qué las dorsales crean un patrón de curvatura característico?

En 1984, David D. Pollard, de la Universidad de Stanford, Jean-Christophe Sempere, entonces en la Universidad de California en Santa Bárbara, y uno de nosotros (Macdonald) observaron que la forma altamente repetitiva de los centros de expansión traslapante podía explicarse atendiendo al modo de desarrollo y propagación de las fisuras a lo largo de las dorsales. Conforme las placas tectónicas se van separando, aparecen fisuras perpendiculares a la dirección de la tensión. A mitad de un segmento, la dirección del esfuerzo suele ser perpendicular al eje de la dorsal; por eso, las fisuras crecerán paralelas a la dorsal. En la región de solapamiento de los segmentos, sin embargo, puede variar la dirección del esfuerzo. A medida que una fisura que arranca de la mitad de un segmento comienza a crecer en el sentido de la región de solapamiento, la fisura se desvía primero de la región para luego curvarse



6. ESTRUCTURAS EXTERNAS A LOS EJES generadas en un centro de expansión traslapante. Eso es lo que se ilustra en el diagrama (*arriba*) y en el mapa (*abajo*). Se representa un centro de expansión traslapante (*1*). Se forma una grieta en la parte sur del vertedero oriental de la dorsal (*2*), permitiendo que la roca derretida salga a la superficie y cree un nuevo remate o prominencia. Esta estructura crece hasta que se solapa con la dorsal occidental en un trecho que triplica el intervalo que los separaba (*3*). Conforme las zonas de roca continúan separándose, la prominencia inicial de la parte oriental de la dorsal se desprende y comienza a alejarse (*4*). Un nuevo remate empieza a formarse por el oeste (*5*). Después de muchos episodios de formación y segregación de los remates o prominencias de la dorsal (*6*), las estructuras exteriores a los ejes evidencian una clara migración hacia el sur. El mapa de alta resolución de una región cercana a los 21 grados sur revela un centro de expansión traslapante que provoca la deriva, en 12 kilómetros, de la Cordillera submarina del Pacífico Oriental. La discontinuidad ha conocido una evolución compleja durante los últimos dos millones de años. La velocidad de emigración ha superado los 200 milímetros por año conforme las prominencias de la dorsal, creadas por el magma, occidentales y orientales, han procedido hacia atrás y adelante, pero el curso neto hacia el sur se ha producido a una velocidad media de 20 milímetros por año. A ambos lados del centro de expansión pueden observarse numerosos vertederos (prominencias) abandonados dentro de una estela cuyo suelo marino es insólitamente profundo. El suelo oceánico está cortado por una hendidura de 80 kilómetros de anchura adyacente a esta discontinuidad. Los colores indican profundidades que van de 2350 metros (*rosa*) a 3500 (*azul obscuro*), pasando por 2900 metros (*amarillo*).

hacia ella [*véase la figura 6*]. La fisura posibilita la salida del magma al suelo marino, lo que crea una nueva protuberancia de la dorsal. Ahora bien, una vez que las fisuras se solapen en un trecho que triplique sus desplazamientos, se detiene bruscamente la propagación de las fisuras. No tardará mucho en comenzar su formación una nueva fisura, detrás de la primera. Conforme se desarrolle la segunda, el magma que ha aflorado y constituido una protuberancia se descarga sobre los flancos abiertos por las placas en su alejamiento mutuo.

Estructuras externas a los ejes

Los centros de expansión que se superponen a lo largo de varios kilómetros dejan, por lo común, "estelas" de corteza oceánica deformada hasta de 80 kilómetros de ancho. El suelo marino de dicha región perturbada, llamada zona discordante, es de 100 a 300 metros más hondo que el circundante. De forma similar, los centros de expansión traslapante se encuentran de 100 a 300 metros más profundos que las porciones someras y ricas en magma de los segmentos de la dorsal. Estos accidentes del relieve han quedado puestos de manifiesto en los mapas levantados por distintas expediciones realizadas en la Cordillera del Pacífico Oriental. Los mapas de las zonas discordantes revelan también protuberancias fósiles de la dorsal, curvadas y de 10 a 40 kilómetros de longitud, que se cortan en los centros de expansión traslapante.

El modelo de suministro de magma explica, así parece, la estructura de los centros de expansión traslapante. Todo indica que esas zonas de coincidencia caen en los extremos de las fuentes de magma, del que suelen carecer. Si ello es cierto, el grosor de la corteza que se crea en los centros de coincidencia podría ser hasta la mitad de la potencia de la corteza que encontramos en la vecindad de los centros de cada segmento. (Potencia que se cifra en seis kilómetros.) Para corroborar la hipótesis hay que proceder, en esas zonas, a extraer las oportunas, y precisas, medidas sísmicas y gravitatorias.

Las mediciones del campo magnético terrestre en los centros de expansión traslapante apoyan la idea de que tales centros aparecen donde el suministro de magma es bajo. La lava que brota de cámaras magmáticas pequeñas, que, alternativamente, se solidifican y se reponen, contiene más

minerales enriquecidos con hierro en un estado altamente magnetizado. Por otro lado, las cámaras magmáticas grandes, que permanecen derretidas entre episodios de aprovisionamiento de magma, producen una lava que es débil desde el punto de vista magnético. Ahora bien, por ser la roca de la vecindad de los centros de expansión traslapante más intensa en su magnetismo que cualquier otra de la dorsal, parece verosímil que los centros se alimenten discontinuamente desde bolsas de magma aisladas.

Por la edad de la corteza en cuyo interior las zonas discordantes se adentran, y basándose en los patrones de las estelas externas al eje, Laura J. Perram, Suzanne M. Carbotte y Marie-Helene Cormier, de la Universidad de California en Santa Bárbara, han demostrado que los segmentos de segundo orden persisten como entidades discretas durante varios millones de años. La posición de las discontinuidades podría oscilar poco a poco de 10 a 20 kilómetros en la dorsal y viajar a lo largo de la misma decenas de kilómetros, a razón de 20 a 100 milímetros por año. La discontinuidad tiende a moverse a golpes; un segmento dorsal puede crecer a una tasa de varios cientos de milímetros por año para luego retraerse y encogerse cierto tiempo, antes de volver a avanzar. De ese modo, vertederos de magma (los remates) de la dorsal en las discontinuidades de segundo orden parecen jugadores de esgrima, en su avance y retroceso por la dorsal, con lentos progresos en una u otra dirección [*véase la figura 6*].

Solapamientos y desviaciones

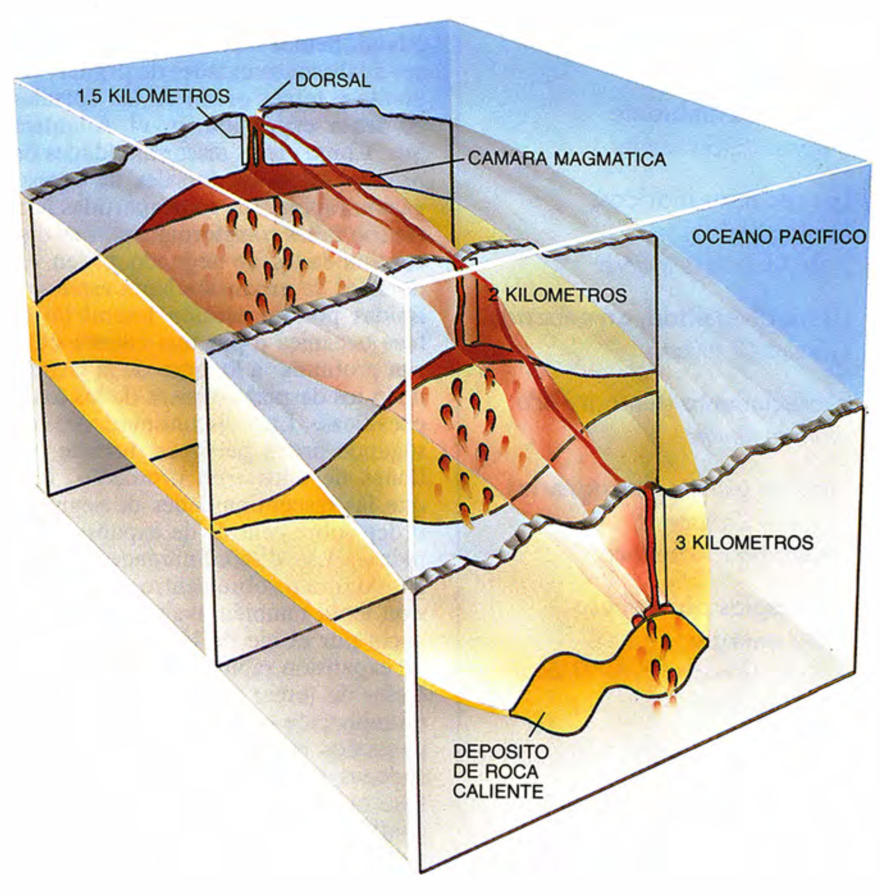
A lo largo de la Cordillera submarina del Pacífico Oriental, las discontinuidades de tercer orden abarcan frecuentemente centros de expansión traslapante que desplazan la dorsal en menos de tres kilómetros. Los segmentos definidos por discontinuidades de tercer orden poseen una longitud que varía de 30 a 100 kilómetros. Se ha demostrado que las discontinuidades de tercer orden se corresponden con fracturas de las cámaras magmáticas.

Los segmentos de la dorsal definidos por este tipo de discontinuidades dejan muy pocas señales, si alguna, de estelas fuera de los ejes. La pequeña traza que producen en la corteza oceánica vieja de los flancos de la dorsal nos permite concluir que las discontinuidades de tercer orden tienen un tiempo de vida geológico muy corto. Su edad no supera, en nuestra opinión, los 10.000 años —el tiempo que tarda una dorsal de expansión rápida en generar dos kilómetros de corteza.

Las discontinuidades de cuarto orden comprenden doblamientos suaves y delgados desplazamientos menores de 500 metros. Se las llama DEVAL: ligeras DEsViaciones de la LInealidad Axial. Las DEVAL distan, entre sí, de 10 a 40 kilómetros. Una DEVAL puede ser la manifestación de una erupción importante; por consiguiente, lo mismo puede ser joven que poseer cientos o miles de años de edad.

Las DEVAL, muy difíciles de detectar, apenas son perceptibles con el sistema de sonar (Haz marino); tampoco las mediciones sísmicas prestan gran ayuda. En algunos casos, la cámara magmática subyacente bajo una DEVAL se hunde un poco; en raras ocasiones exhibe una fractura visible. En la mayoría de los casos, esas cámaras son más o menos continuas. Durante la campaña de 1982, uno de nosotros (Fox) señaló al otro (Macdonald) su descubrimiento de varias DEVAL en los mapas de Haz marino; Macdonald le repuso que había mirado los mapas en un buque balancero. Coincidimos en que había que centrarse en los desplazamientos más largos, si queríamos que la gente creyera en nuestras ideas.

En efecto, no se reconoció el carácter distintivo y notable de los segmentos de cuarto orden (las secciones de la dorsal entre cada DEVAL) hasta 1986, cuando Charles H. Langmuir, del Observatorio Geológico Lamont-Doherty, y John F. Bender, de la Universidad de Carolina del Norte en Charlotte, analizaron la geoquímica de un bloque de 500 kilómetros de la Cordillera submarina del Pacífico Oriental. Los investigadores recogieron muestras de roca procedentes de lugares precisos del suelo oceánico con el objeto de establecer si la segmentación estructural estaba asociada con las variaciones químicas de las rocas. Encontraron que las rocas del interior de cada segmento de cuarto orden poseían una composición similar,



7. SE SUPONE QUE LAS CAMARAS MAGMATICAS se extienden por debajo de dorsales de expansión rápida. La cámara magmática es un lentejón formado en su mayor parte por roca derretida; esa cavidad se asienta en la parte alta de un depósito de roca parcialmente fundida. La cámara y el depósito son pequeños y se hallan pobremente abastecidos de roca fundida en la vecindad de una discontinuidad (*región más profunda en primer plano*). Adquieren mayor volumen y reciben un suministro importante cuando existen lejos de la discontinuidad (*que aparece en segundo plano*).

mientras que las procedentes de otros segmentos distintos presentaban una constitución química diferente. Esos análisis han atestiguado la naturaleza fundamental de la segmentación en un amplio rango de escalas y han servido para identificar otras muchas DEVAL.

¿Por qué difieren las DEVAL en su composición quimica? Para unos, habría pequeños compartimientos que dividirían la cámara magmática subyacente bajo segmentos contiguos de cuarto orden. Estas divisiones impedirían la mezcla de magma en las cámaras. Pero se han detectado muy pocas brechas de esas en las cámaras magmáticas que yacen debajo de las DEVAL. Para otros autores, podrían inyectarse localmente en el interior de la cámara lechadas de roca fundida procedentes de fuentes aisladas del manto superior, magma que podría llegar al suelo marino antes de que se produjera una mezcla más vigorosa. Este proceso crearía un segmento de cuarto orden con una geoquímica distinta. Necesitamos más datos para confirmar o refutar estas ideas.

Nosotros, Carbotte y Nancy R. Grinlay, de la Universidad de Rhode Island, hemos identificado varias clases de discontinuidades de primer, segundo y tercer orden en las dorsales de lenta expansión en el Atlántico Sur. Como en las discontinuidades de primer orden en dorsales de propagación rápida, sus contrapartidas lentas son fallas transformantes. Las discontinuidades de segundo orden en dorsales de expansión lenta están definidas por un escalón lateral de la fosa oceánica o por una cuenca oblicua profunda, a lo largo de la cual se unen los desplazamientos de las fosas oceánicas. Las discontinuidades de segundo orden persisten durante millones de años —en promedio, más que las discontinuidades de segundo orden sobre centros de expansión rápida—. Las discontinuidades de segundo orden sobre centros de expansión lenta también avanzan más despacio por el eje de la dorsal que las de expansión rápida. Las discontinuidades de tercer orden en centros de diseminación o expansión lenta crean pequeños desplazamientos en largas cadenas volcánicas del suelo de la fosa oceánica, en tanto que las discontinuidades de cuarto orden pueden constituir pequeños hiatos entre volcanes.

Vida marina y segmentación

Oceanógrafos, geotectónicos y geoquímicos comienzan a comprender algunas de las implicaciones de la segmentación en dorsales de expansión lenta y rápida. Hemos hallado ejemplos claros de estructuras de primer, segundo, tercer y cuarto orden y estructuras intermedias. ¿Pasan, los segmentos, del cuarto al primer orden para iniciar otro ciclo? Sabemos que la segmentación ha constituido un proceso fundamental durante, al menos, 100 millones de años. ¿Ha desempeñado la segmentación su papel en un período mucho más dilatado? Los investigadores han estudiado las comunidades de fauna exótica que medran en las proximidades de las fuentes termales de la Dorsal Centro-oceánica. ¿Guardan relación la supervivencia y la emigración de esas comunidades con la longevidad de cada segmento?

De estas cuestiones ha de ocuparse el programa RIDGE (acrónimo que significa dorsal y que responde a las iniciales de la expresión inglesa "Experimentos globales interdisciplinarios en la dorsal"). Entre sus objetivos, se propone cartografiar los ejes y los flancos de la Dorsal Centro-oceánica entera y generar imágenes precisas de las estructuras externas a los ejes. De momento, sin embargo, los geólogos y los oceanógrafos sólo llevan cartografiado menos del cinco por ciento del suelo marino. Más de la mitad de la corteza terrestre permanece inexplorada.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE GEOLOGY OF DEEP-SEA HOT SPRINGS. Rachel M. Haymon y Ken C. Macdonald en *American Scientist*, vol. 73, n.° 5, págs. 441-449; septiembre/octubre de 1985.

SEGMENTATION OF MID-OCEAN RIDGES. Hans Schouten, Kim D. Klitgord y John A. Whitehead en *Nature*, vol. 317, n.° 6034, págs. 225-229; 19 de septiembre de 1985.

PETROLOGICAL AND TECTONIC SEGMENTATION OF THE EAST PACIFIC RISE, 5°30'-14°30'N. Charles H. Langmuir, John F. Bender y Rodey Batiza en *Nature*, vol. 322, n.° 6078, págs. 422-429; 31 de julio de 1986.

MULTI-CHANNEL SEISMIC IMAGING OF A CRUSTAL MAGMA CHAMBER ALONG THE EAST PACIFIC RISE. R. S. Detrick, P. Buhl, E. Vera, J. Mutter, J. Orcutt, J. Madsen, y T. Brocher en *Nature*, vol. 326, n.° 6108, págs. 35-41; 5 de marzo de 1987.

A NEW VIEW OF THE MID-OCEAN RIDGE FROM THE BEHAVIOUR OF RIDGE-AXIS DISCONTINUITIES. Ken C. Macdonald, P. J. Fox, L. J. Perram et al. en *Nature*, vol. 335, n.° 6187, págs. 217-225; 15 de septiembre de 1988.

Peces rana

Maestros del mimetismo agresivo, estos carnívoros voraces pueden tragar sus presas más rápidamente que cualquier otro vertebrado depredador conocido

Theodore W. Pietsch y David B. Grobecker

En la mañana del 29 de diciembre de 1696, un capitán holandés y su tripulación se hallaban buscando a los supervivientes de un buque que se había hundido no lejos de la costa de Australia Occidental. Aunque nunca se encontraron supervivientes, lo que sí halló la tripulación, varado en la playa de una isla cercana (entre ratas del tamaño de los gatos domésticos), fue un pez notabilísimo. Así se descubrió ese ejemplar, distinto de cuantos peces habían nunca visto los marineros: "medía unos sesenta centímetros de longitud y tenía la cabeza redonda, una especie de brazos y patas e incluso algo parecido a manos". No nos cabe la menor duda (aunque la identidad específica no se sabrá nunca) de que ser tan extraño, sumariamente descrito hace casi tres siglos, era un pez rana.

El nombre les es apropiado. Presentan un sorprendente parecido con las ranas: su cuerpo (cuya longitud oscila entre los dos y los cuarenta centímetros) es globoso y está equipado con aletas bien desarrolladas, que semejan patas y que les permiten gatear por las rocas, arenas y arrecifes de coral, como si fueran tetrápodos terrestres. Se presentan en casi todos los colores imaginables y pueden alterar su aspecto hasta confundirse con los objetos de su entorno (verbigracia, un fragmento de coral), en cuestión de días y, en algunas especies, en pocos segundos. Así, un pez rana que se mueve de un tipo de sustrato a otro puede cambiar de color y seguir disimulándose en su entorno. Esa es la razón de que la mayoría resulte punto menos que imposible de distinguir de su ambiente; muchos pasan, pues, inadvertidos (y no sólo a sus depredadores, sino también a buceadores e ictiólogos expertos).

THEODORE W. PIETSCH y DAVID B. GROBECKER han colaborado en varios proyectos de investigación. Pietsch es profesor de pesquerías en la Universidad de Washington, a cuya facultad pertenece desde 1978. En reconocimiento a su labor sobre la sistemática, comportamiento y ecología de los peces marinos ha sido nombrado miembro de la Sociedad Linneana de Londres y también de la Academia de Ciencias de California. Grobecker, que fue alumno de Pietsch en Seattle, dirige la Fundación de Investigación del Océano Pacífico, de Kailua-Kona, Hawai.

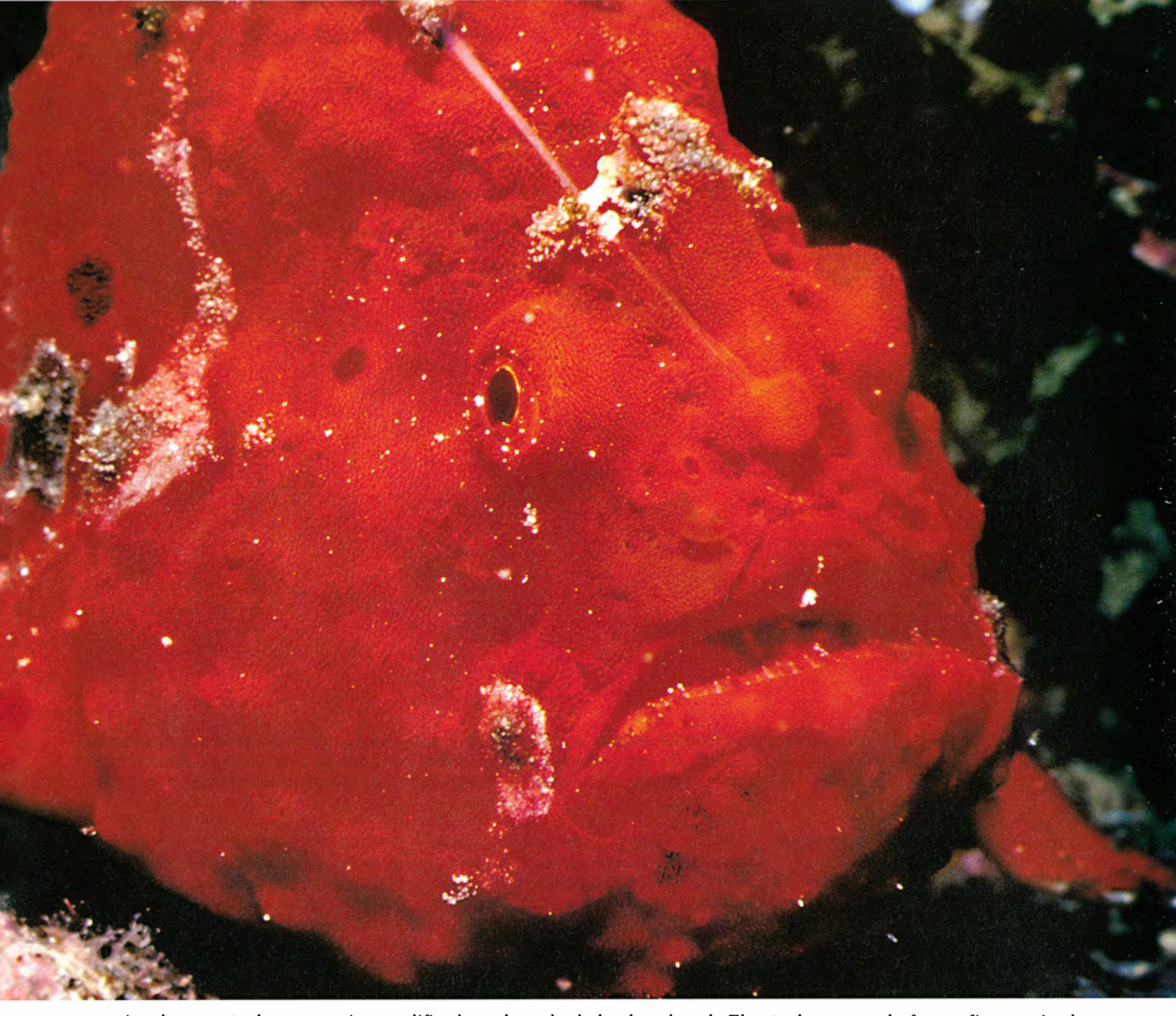
El pez rana de Commerson, *Antennarius commersoni*, que se halla ampliamente extendido por los océanos Indico y Pacífico, es representativo del grupo por muchos motivos. Machos y hembras gozan de una gran variabilidad cromática (rojo, amarillo, pardo, blanco crema, negro y tonalidades intermedias); su piel, además, está moteada por un modelo regular de puntitos pardos y manchas rosadas. En aguas someras, donde los rayos de luz solar motean el fondo oceánico, el pez presenta un parecido notable (casi fantástico) con las rocas incrustadas de algas. Y allí aguarda, arquetipo de depredador al acecho, listo para atacar a cualquier pez o crustáceo que pace cerca. Si una posible víctima se acerca, la boca grande y cavernosa del pez rana se abre, tragándose al desdichado en cuestión de milisegundos.

De este modo, el dominio del arte del mimetismo ha dotado a los peces rana de una importante ventaja evolutiva. Camuflados en objeto inanimado, no sólo pasan inadvertidos a los animales que los predan, sino también a sus propias presas. Han alcanzado, además, un nivel de sorprendente eficacia a la hora de atraer a sus presas hasta la distancia de ataque, debido, en gran parte, a un pequeño apéndice; el señuelo, tal es su nombre, se proyecta inmediatamente por encima del labio del animal y lo agitan cuando avistan una presa.

Ya el año 344 a. de C., Aristóteles señalaba a propósito del papel del señuelo: "El rape tiene una dotación de filamentos que arrancan de la parte anterior de sus ojos; son largos y finos como pelos... y son utilizados como cebos". Estas observaciones fueron confirmadas en 1875 por el reverendo S. J. Whitmee, de Samoa, que describió la pesca con cebo en un pez rana: "Pescaba con su caña... algunos de los pececillos del acuario. Yo esperaba verlo capturar alguno, pero eran demasiado cautelosos".

Las observaciones de Whitmee, más tarde corroboradas por otros, ejemplifican lo que hoy en día se conoce, en biología del comportamiento, por mimetismo agresivo. A diferencia del mimetismo pasivo (en el

1. PEZ RANA PINTADO, Antennarius pictus*; vive en las aguas cálidas de las islas Hawai. Atrae a sus presas*



agitando un señuelo: una espina modificada y alargada de la aleta dorsal. El señuelo, que en la fotografía se extiende diagonalmente hacia arriba entre los ojos del pez, termina en una estructura llamada esca, o cebo. Los animales que son atraídos por el señuelo y se acercan a la boca cavernosa del pez rana son absorbidos en cuestión de milisegundos.

que el camuflaje, o asimilación de un animal a su entorno, proporciona cierto grado de protección frente a los depredadores), el mimetismo agresivo requiere que un animal imite un objeto específico, tanto desde el punto de vista físico como desde la perspectiva del de comportamiento, con el fin de obtener alguna ventaja de ello. En otras palabras, al imitar no sólo un objeto inanimado, sino también el comportamiento y el aspecto de un determinado tipo de alimento, el pez rana puede atraer a otro animal hacia el interior de su zona de ataque. Los estudios que hemos realizado nos permiten afirmar que los peces rana, con su amplio dispositivo de adaptaciones especializadas, constituyen uno de los mejores (por su refinada evolución) ejemplos de mimetismo agresivo de la naturaleza.

Los peces rana integran la familia Antenáridos, que a su vez pertenece a a un conjunto mayor de peces óseos, los Ceratioideos, o, vulgarmente, peces pescadores de caña. Como su nombre popular indica, se trata de depredadores sedentarios que cazan al acecho y atraen a sus presas con ayuda de un señuelo. En los peces rana, el señuelo (extensión prominente de la primera espina de la aleta dorsal) cimbrea hacia delante desde la cara, imitando la acción de vaivén de la caña de un pescador. En algunas especies todo el aparato se dobla hacia atrás y encaja en un estrecho surco de la parte superior de la cabeza; el señuelo queda así protegido cuando no se utiliza.

Los señuelos, que varían de una especie a otra, constan de dos partes principales: la propia espina y la esca o cebo, que es una estructura carnosa y vistosa situada en su extremo. Según las especies, la esca puede variar de tamaño y forma desde una simple bola de tejido, de quizá 1/6 de centímetro de diámetro, hasta una estructura muy ornamentada y filamentosa de 2,5 centímetros o más de longitud. En algunas especies la esca evoca la

*2. LOS PECES RANA pertenecen a una familia extensa y variada (los Antenáridos), tal como se muestra en estas ilustraciones, realizadas hace más de 100 años. De izquierda a derecha, arriba: pez rana de Commerson (*Antennarius commersoni*), pez rana estriado (*Antennarius striatus*), pez rana de espiguillas (*Rhycherus filamentosus*) y pez rana*

forma de un pececillo; en otras, la de un crustáceo o un gusano.

Aunque ampliamente distribuidos en las aguas tropicales y subtropicales de todo el mundo, incluidos el golfo de California y el mar Rojo, la inmensa mayoría se halla confinada en las áreas costeras de Indonesia, las Filipinas y otras islas del Pacífico meridional. La especie *Histrio histrio* vive entre los frondes de los sargazos flotantes, pero el resto pasa su vida en el fondo oceánico (en zonas donde el agua es somera o moderadamente profunda) o sobre rocas o arrecifes de coral.

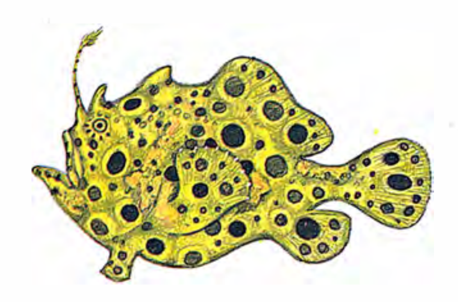
Los taxónomos suelen estar de acuerdo en que existen unas 41 especies conocidas de peces rana, aunque a lo largo del último siglo se han descrito formalmente hasta 165. Esta confusión taxonómica debe achacarse en parte a la inmensa variedad, en el color y en la pauta de coloración, que se da dentro de una misma especie.

Los individuos están facultados para pasar de una a otra a lo largo de dos fases cromáticas: una clara (por lo general, amarillo o canela) y una fase oscura (con frecuencia verde, rojo oscuro o negro). Aunque la fase clara parece predominar en la mayoría de hábitats (por razones que no acabamos de conocer), no es insólito encontrar una zona donde esté representada toda la gama de color de una especie.

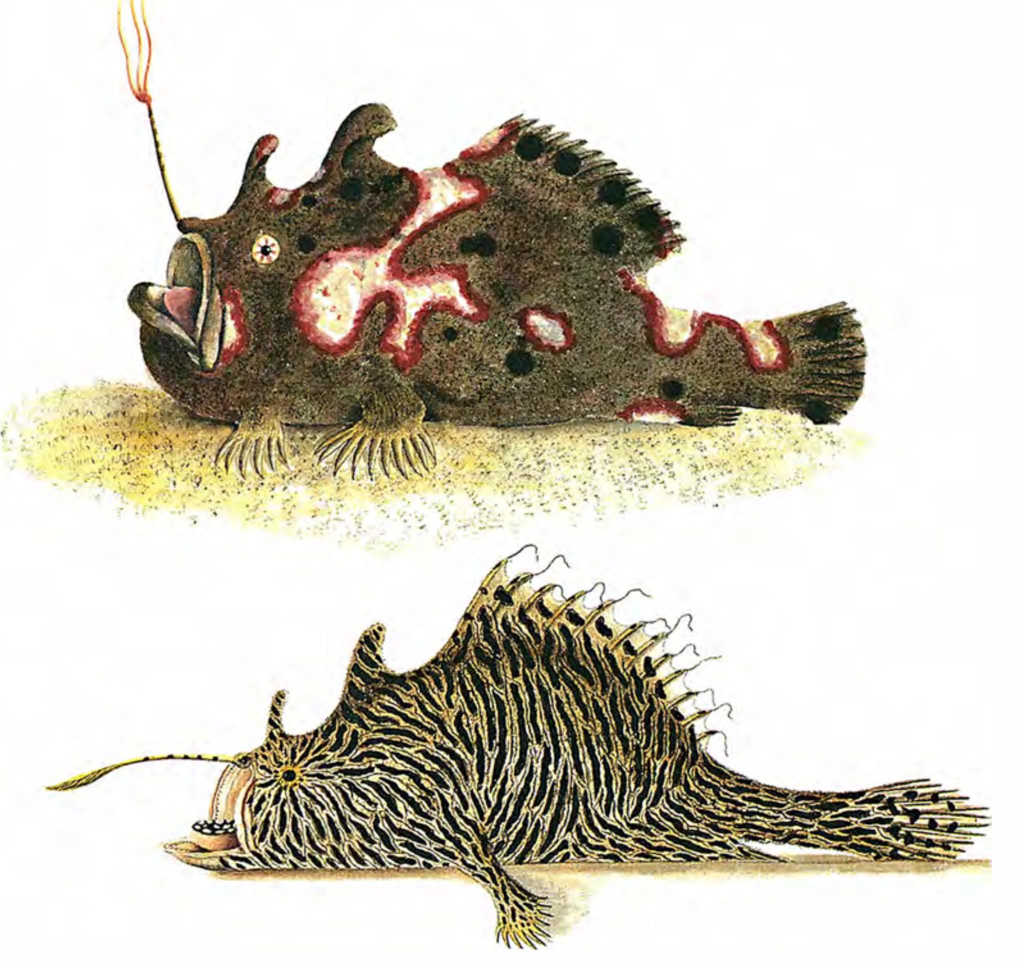
El pez rana estriado, *Antennarius striatus*, por ejemplo, mantiene al menos cuatro fases de color distintas: una fase verde, durante la cual remeda la roca tapizada de algas; una fase anaranjada, en que muestra el aspecto de una esponja de ese color; una fase blanca, que le acerca a las esponjas blancas, y una fase negra, en que semeja una esponja negra. Dábamos por supuesto que esa transformación cromática ocurría cuando el pez se trasladaba a un hábitat ligeramente distinto: por ejemplo, una región del arrecife coralino donde predominaran las esponjas anaranjadas en vez de las blancas.

Con el fin de comprobar la respuesta de los peces rana a señales visuales del entorno diseñamos un experimento con dos especies: el pez rana tuberculado, *Antennatus tuberosus*, y el pez rana de Commerson, *Antennarius commersoni*. Pusimos distintos ejemplares en acuarios de observación separados; después de un período de habituación, cambiamos el color del sustrato de grava (de blanco a negro) y añadimos piedras y coral en varias combinaciones de color. Aunque el pez rana tuberculado mudó del gris oscuro al crema claro y el pez rana de Commerson pasó del amarillo limón al rojo ladrillo, no pudimos determinar los estímulos responsables de la transformación de color. Ni que decir tiene que hay que proseguir la investigación en condiciones naturales.

Sabemos que los peces rana son depredadores voraces. No suelen fallar. Amén de seleccionar sus preferencias alimentarias, pretenderán tragarse



3. VARIACION de la pigmentación, que puede ser muy notable dentro de



*pintado (*Antennarius pictus*). De izquierda a derecha, abajo: pez rana de tres manchas (*Lophiocharon trisignatus*), pez rana de Nueva Guinea (*Antennarius dorehensis*), pez rana verrugoso (*A. maculatus*) y pez rana estriado (*A. striatus*).*

cualquier cosa que se halle a distancia de tiro, lo que incluye animales mayores que ellos mismos. Al estudiar el comportamiento alimentario de los antenáridos hemos averiguado, por ejemplo, que un pez rana puede dilatar, hasta 12 veces, las dimensiones de su boca; aún más: puede hacerlo en unos seis milisegundos, en menos tiempo, por tanto, del que tarda un músculo estriado normal en contraerse. También hemos analizado su forma de locomoción, que va desde "andar" sobre el sustrato hasta la propulsión a chorro.

A lo largo de 15 años hemos desarrollado nuestro trabajo en el laboratorio y en aguas de la costa de Oahu, Hawai, y en el puerto australiano de Sydney. Gracias a ello contamos con registros variables de datos etológicos y ecológicos relativos a ocho especies distintas: el pez rana de Commerson, el pez rana estriado, el pez rana tuberculado, el pez rana híspido (*Antennarius hispidus*), el pez rana verrugoso (*A. maculatus*), el pez rana escarlata (*A. coccineus*), el pez rana sangriento (*A. sanguineus*) y el pez rana de tres manchas (*Lophiocharon trisignatus*).

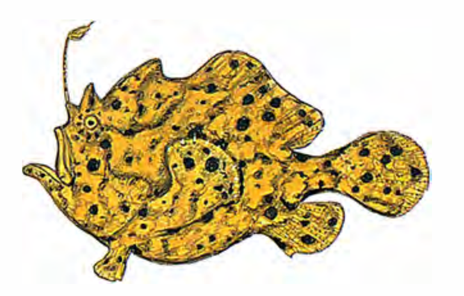
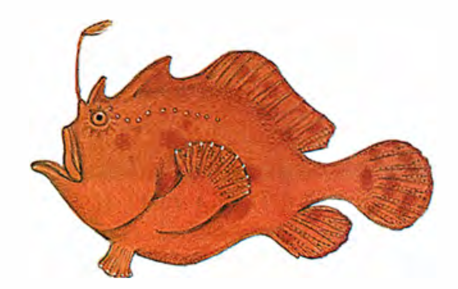
Empezamos por analizar el comportamiento de atracción mediante señuelo. En particular, deseábamos saber si la caza con señuelo influía directamente sobre los tipos de presas. ¿Son los señuelos específicos de especie, es decir, tiene cada especie de pez rana un señuelo morfológicamente único? ¿Existe correlación entre el aspecto del señuelo y la dieta, es decir, se parece el señuelo a los tipos de alimento preferidos por la posible víctima atraída?

Forma y tamaño del señuelo son, tal parece, exclusivos en la mayoría de especies; de hecho, hay especies que se identifican tomando por criterio ese apéndice. La esca del pez rana estriado parece un gusano poliqueto; la del pez rana híspido, un gusano tubícola; la del pez rana verrugoso, un pececillo, y, una gambita, la esca del pez rana de Commerson.

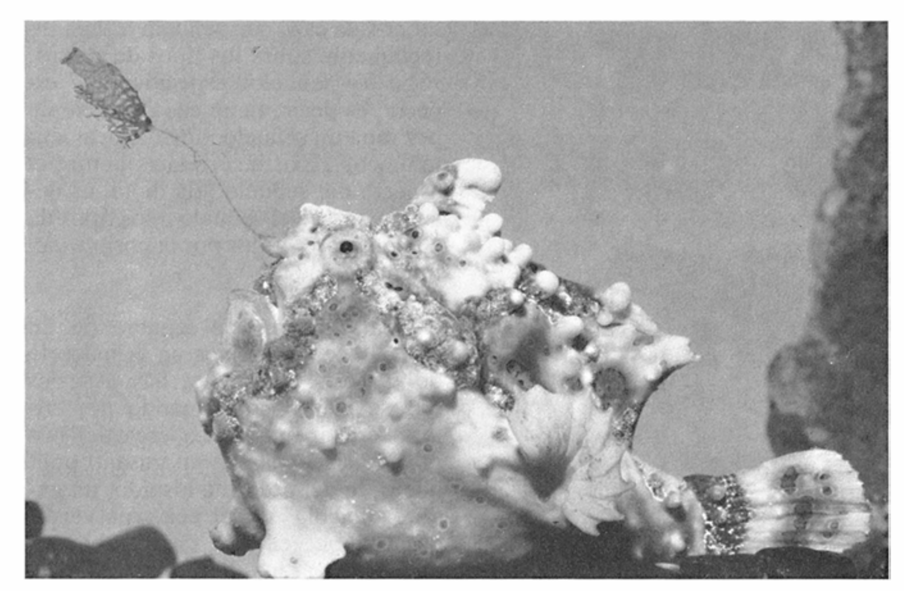
Sin embargo, la fuerza del señuelo se basa en algo más que en el aspecto. El pez rana debe mover y manipular el señuelo de manera que simule los movimientos de natación propios del animal que se está imitando. El señuelo pisciforme del pez rana verrugoso ondea cuando se mueve en el agua y remeda así las ondulaciones laterales de un pececillo [*véase la figura 4*].

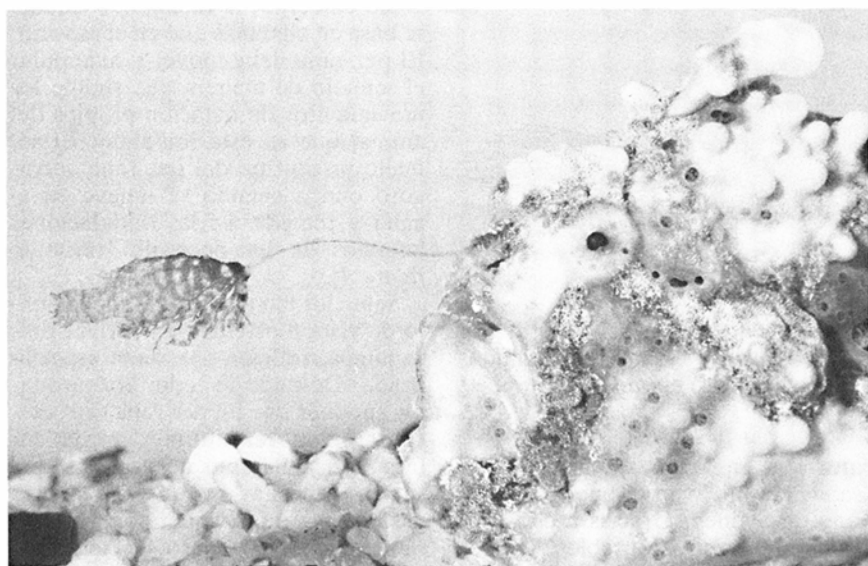
Señuelos tan distintos desde el punto de vista morfológico podrían, presumimos, reflejar una dieta especializada. Después de todo, era razonable suponer que un pez rana estriado, con su esca vermiforme, se alimentara principalmente de especies que suelen depredar poliquetos u otros gusanos marinos (y que, por tanto, se sienten atraídos por éstos). Para comprobar esa hipótesis decidimos analizar los contenidos estomacales de cuatro especies: *Antennarius striatus*, *A. pictus*, *A. commersoni* y *Antennatus tuberosus*. Para nuestra sorpresa, el estudio reveló que los peces rana no eran depredadores especializados; se alimentaban de un surtido muy variado de presas.

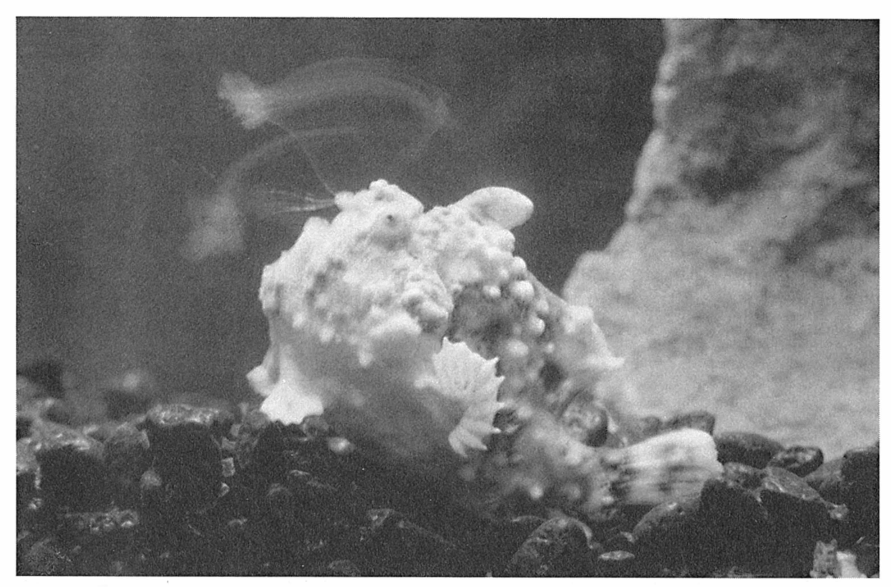
No era, en efecto, lo que esperábamos. ¿Por qué la evolución propiciaba señuelos tan complejos y exclusivos de cada especie, cuando cual-

una especie. Se cree que los individuos cambian de color para imitar los objetos de su ambiente. Aquí se presentan cuatro de las muchas fases de color y de patrones de dibujo del pez rana pintado.







4. EN MANIFIESTA IMITACION de su entorno, en este caso una roca incrustada de algas (arriba)*, el pez rana verrugoso,* A. maculatus*, posa durante horas a la espera de que una posible presa se acerque nadando. El extremo del señuelo (denominado esca) varía de una especie a otra; en ésta se parece a un pececillo* (centro)*. Cuando divisa otro animal, el pez rana agita su señuelo (*abajo*) y recuerda los movimientos de un pececillo.*

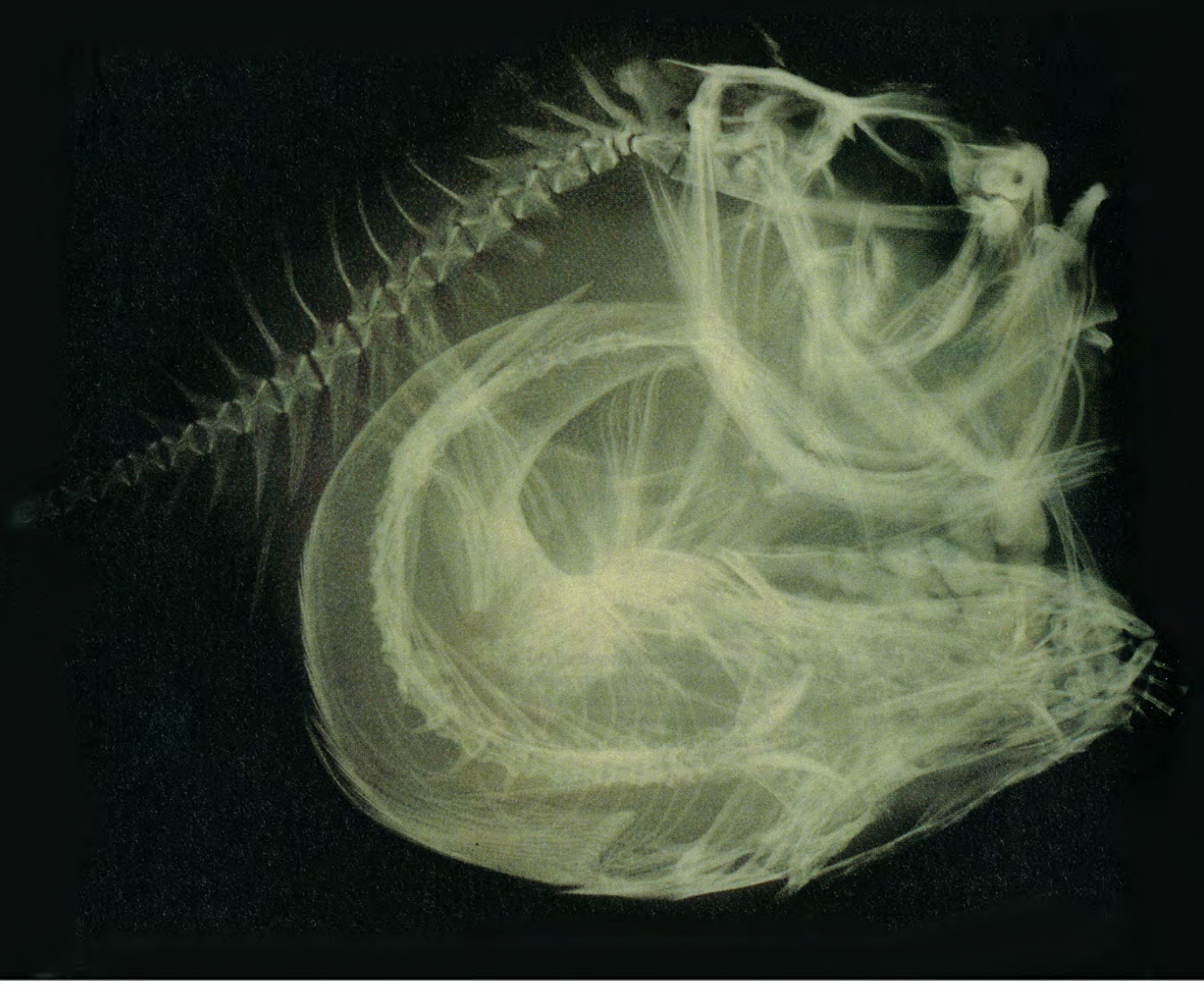
quier pez rana estaba dotado para atraer presas de diversa índole? Una posible explicación reside en que la adquisición de alimento en el ambiente marino es, a la vez, impredecible y compleja. Muchos organismos penetrarán por casualidad en la llamada zona de ataque de un pez rana sin ser llevados hasta allí por el señuelo; otros tampoco acudirán por el señuelo en movimiento, sino por el propio pez rana, confundido con un lugar adecuado (por ejemplo, un fragmento de coral) donde poner huevos, ramonear o buscar cobijo.

Otra posibilidad es que el señuelo desencadene una respuesta defensiva o territorial por parte de los peces vecinos. En un experimento de laboratorio con un pomacéntrido, el pez damisela *Dascyllus aruanus*, observamos que éste, colocado en el mismo acuario que un pez rana, desarrollaba repetidas exhibiciones agresivas hacia el señuelo. En varias ocasiones, en lo que parecía ser un ataque sin cuartel el pez damisela penetraba en la zona del pez rana y era comido.

La captura es, en estos casos, instantánea. La verdad es que casi cualquier pez que nade en el interior de la zona de ataque (un área cuyo radio es unos dos tercios la longitud del pez rana) tiene pocas probabilidades de salir. Por lo que sabemos, el pez rana extiende la boca y engulle a su víctima a una velocidad superior a la de cualquier otro vertebrado depredador. Esta captura rápida de la presa constituye, a buen seguro, el más notable de todos los atributos del pez rana.

Con ayuda de la cinematografía ultrarrápida y otras técnicas modernas, invertimos bastante tiempo en el análisis de la biomecánica de la alimentación en tres especies: *A. striatus*, *A. hispidus* y *A. maculatus*. Integrando los análisis, imagen a imagen, de películas de alta velocidad (de 800 a 1000 fotogramas por segundo) con análisis anatómicos de los huesos, músculos y ligamentos de la cabeza del pez, hemos llegado a la conclusión de que la captura de presas implica una secuencia de comportamientos perfectamente orquestada.

Pueden identificarse tres fases funcionalmente distintas: comportamiento de preataque, ataque propiamente dicho y manipulación de la presa, que implica la deglución. Durante la primera fase, la de preataque, el pez rana sigue la presa con la vista hasta que llega hasta cierta distancia del pez rana (unas siete veces la longitud del cuerpo). A partir de ese momento, el pez rana comienza a agitar su señuelo. Si la presa responde acercándose

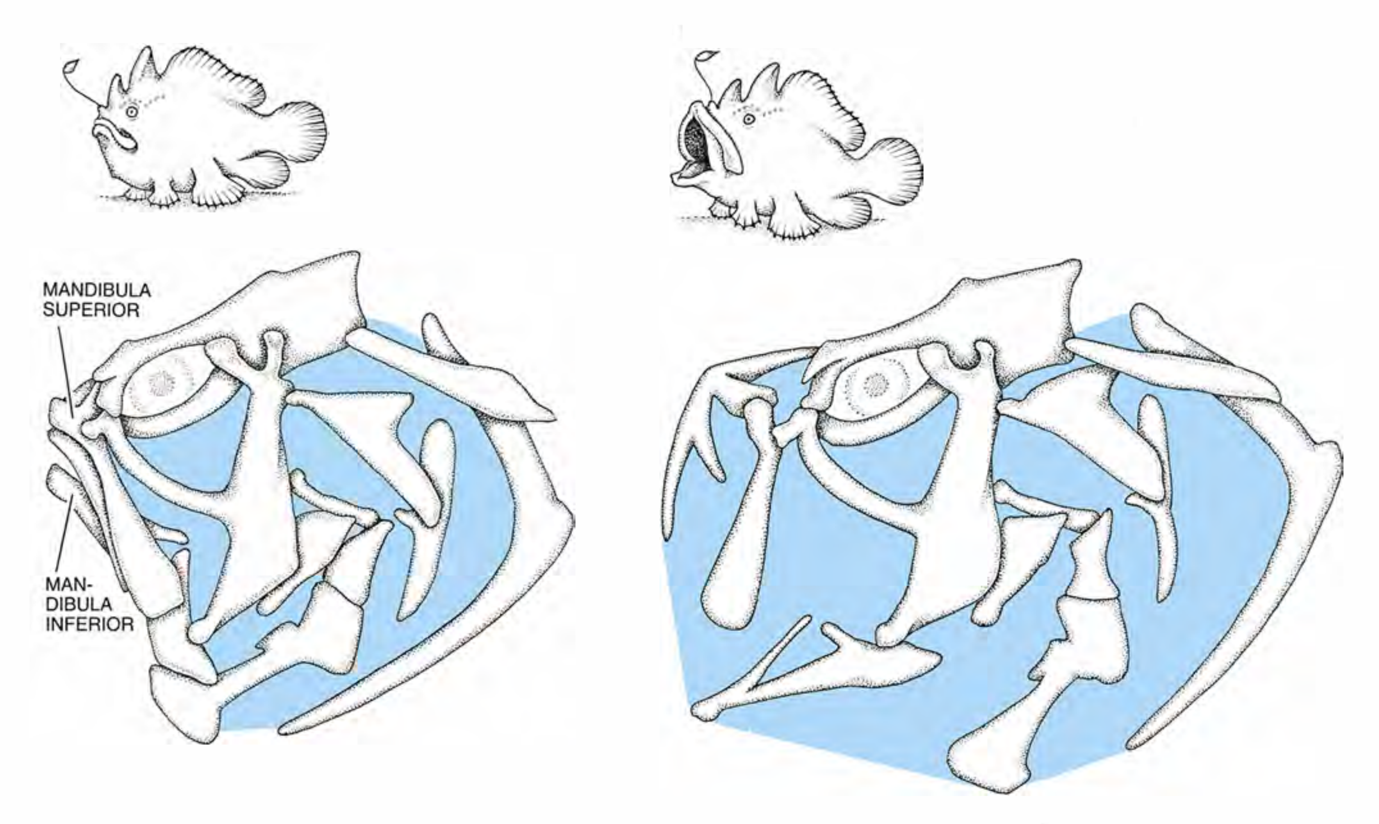


5. RADIOGRAFIA que muestra que el pez rana de señuelo largo, A. multiocellatus, *se ha tragado un pez escorpión (*Pontinus sp.*), cuya longitud supera la del depredador. Este puede tragarse presas tan grandes porque la boca dilata su tamaño en un factor de 12 o más.*

al cebo, el pez rana pasa a la fase de ataque; si aquélla no responde, éste puede encaminarse hacia ella, primero con rapidez y luego despacio. Durante la fase lenta el pez rana aplana su cuerpo en lo que parece una posición en cuclillas; de ese modo, llamará menos la atención de su víctima. Cuando la presa se halla a una distancia aproximada de un cuerpo del pez rana (ahora en la fase de ataque), éste se orienta girando o meciendo su cuerpo en la posición adecuada para el golpe.

El pez rana espera que la presa penetre en su zona de ataque. Levanta entonces la cabeza y abre la boca, lo que consigue deprimiendo la mandíbula inferior al mismo tiempo que expande la superior. La boca forma así un tubo largo, que succiona a la víctima hacia dentro, a la manera de la aspiradora que absorbe el polvo de una alfombra. Con la presa en la boca, el pez rana inicia la fase de manipulación. Mientras la traga, ingiere también abundante agua, que facilita el paso de las presas grandes al esófago del pez rana. Terminada la deglución, el exceso de agua se expulsa a través de las branquias, y se cierra un músculo en esfínter de la base del esófago para evitar que la presa se escape.

Este método de captura, adoptado por la mayoría de peces del mundo, se conoce por alimentación de boqueo y succión. Se basa en un principio elemental: se crea una presión negativa (succión) mediante la expansión rápida de la cavidad branquial y de la boca, lo que origina un flujo de agua hacia el interior y aumenta la velocidad de ingestión de la presa. A diferencia de los depredadores de natación rápida, que aprovechan la velocidad del cuerpo para ingerir las presas, los depredadores que cazan al acecho confían en la rápida expansión de su cavidad oral para sorprender y capturar a sus presas. El depredador de boqueo y succión puede, además, alimentarse de presas sin alertar, con su presencia, a otras víctimas potenciales. Por ejemplo, los peces que se hallan muy cerca unos de otros parecen no darse cuenta de la desaparición súbita de uno de sus vecinos, con lo que resultan vulnerables a los

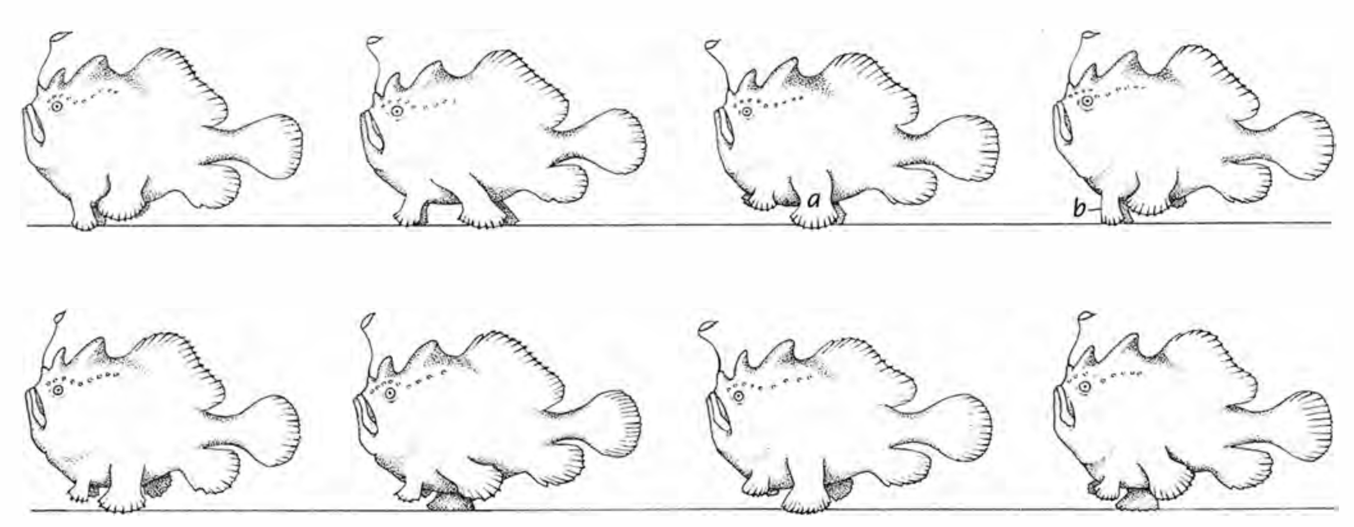


6. LA BOCA DE UN PEZ RANA permanece cerrada (izquierda) *hasta que la presa se acerca a la distancia de ataque. El pez rana contrae, entonces, los músculos de su tronco y garganta superior e inferior, para levantar la cabeza y abrir la boca* (derecha)*; estas mismas contracciones musculares hacen que la mandíbula superior empuje hacia afuera y que la mandíbula inferior descienda. Cuando la boca se dilata, se extiende hacia adelante (un proceso que tarda unos seis milisegundos), lo que permite al pez rana succionar a su víctima.*

ataques repetidos de un carnívoro que caza al acecho.

Los peces rana se distinguen de los demás peces en el grado y celeridad de la expansión de la boca. Hemos determinado, mediante la inyección de parafina líquida a bocas cerradas y completamente extendidas de peces conservados, que dilatan la boca mucho más que otros cazadores de boqueo y succión. La perca europea, *Perca fluviatilis*, por ejemplo, cuando come expande su boca sólo en un factor de seis.

La boca del pez rana se dilata con una rapidez increíble. Los análisis de películas ultrarrápidas muestran que el pez rana híspido abre su boca y absorbe su presa en menos de seis milisegundos. Eso vienen a tardar el pez rana estriado y el verrugoso. Por mor de comparación, el pez piedra, *Synanceia verrucosa*, segundo en velocidad entre los depredadores de boqueo y succión, tarda 15 milisegundos, y la perca europea precisa no menos de 40 milisegundos.



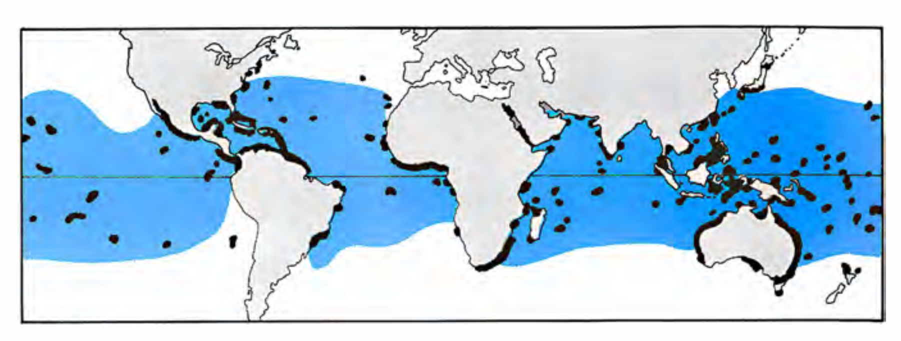
7. LOS PECES RANA SE DESPLAZAN sobre el sustrato con la ayuda de aletas que parecen patas. Lo hacen de dos maneras: con ayuda de "muletas" (arriba) *o "andando"* (abajo)*. Cuando se vale de las "muletas", el pez avanza cargando su peso sobre las aletas pectorales* (a)*; las aletas pélvicas* (b) *soportan el peso del animal sólo cuando las pectorales cambian de posición. Al "andar", alterna sus aletas pectorales, y avanza moviendo primero una y luego la otra, de manera muy parecida a como una persona mueve las piernas en la marcha.*

Anduvimos dándole vueltas a los mecanismos que posibilitarían tal velocidad. ¿Tendrían los peces rana mandíbulas especialmente modificadas? ¿Acaso una dotación muscular exclusiva? ¿Qué es lo que explica su extraordinaria capacitación para aprehender las presas? Con el fin de hallar respuesta a estas preguntas, disecamos la cabeza de varias especies y examinamos minuciosamente los músculos responsables de la apertura de la mandíbula. Llegamos a unos resultados desconcertantes: no había diferencias estructurales reseñables entre los músculos mandibulares de los peces rana y los de otros vertebrados; más aún, ni siquiera diferencias significativas en la estructura ósea.

Aunque nos queda todavía por determinar de qué medios se valen los peces rana para abrir tan rápidamente la boca, presumimos la existencia de un mecanismo responsable hasta ahora desconocido. Quizá se trate de un mecanismo biomecánico de alimentación similar al mecanismo de las pulgas, que les permite almacenar energía elástica en el tórax y de este modo saltar a alturas increíbles. ¿Poseerán estos peces un mecanismo de catapulta en la mandíbula que les permita almacenar energía elástica y después liberarla rápidamente? Opinamos, en efecto, que debe existir tal modificación, aunque son precisos más estudios para confirmarla.

La familia Antenáridos goza de otras adaptaciones muy complejas y fascinantes, que incluyen formas originales de locomoción. Para desplazarse sobre el sustrato, ya sea en persecución de una presa o en busca de un nuevo lugar en el que descansar, emplean dos tipos de andaduras propias de tetrápodos. Una de ellas recuerda el desplazamiento de una persona que utiliza muletas: las aletas pectorales (como muletas) soportan el peso del cuerpo del pez cuando éste avanza; sólo al final del movimiento el peso se transfiere brevemente a las aletas pélvicas. El otro modo de andar evoca la marcha de los vertebrados terrestres, que ambulan moviendo las patas alternativamente. Las aletas pectorales proporcionan la fuerza para andar, mientras que las pélvicas sirven para estabilizar al pez. También nadan, lo que hacen ondulando el cuerpo a medida que se desplazan. Además, suelen moverse también mediante propulsión a chorro, lo que consiguen ingiriendo grandes cantidades de agua que proyectan hacia atrás a través de las aberturas branquiales.

Mecanismos de alimentación ultrarápidos, propulsión a chorro y estratagemas de mimetismo agresivo no son, por sí mismos, exclusivos de los Antenáridos; cada adaptación por separado puede encontrarse en múltiples especies más de peces. Pero en ningún otro grupo se hallan adaptaciones tan evolucionadas y complejas integradas en un mismo organismo. No se trata sólo de la capacidad de atraer a la presa, cambiar de color o gatear por el sustrato lo que merece su interés; más importante resulta que la selección natural haya favorecido la evolución de tantas especializaciones en una sola familia. Comprender las adaptaciones morfológicas y de comportamiento de estos mimetas agresivos es, sin ninguna duda, un reto que continuará desafiando a los investigadores durante muchos años.



8. DISTRIBUCION GEOGRAFICA de los peces rana. Se encuentran en aguas tropicales y subtropicales. Abundan en las aguas costeras de Indonesia, las Filipinas y otros grupos de islas del Pacífico meridional. Hay pocas especies al norte o al sur de la región que se indica en color; la mayoría prefieren áreas donde la temperatura media anual de las aguas supera los 20 grados.

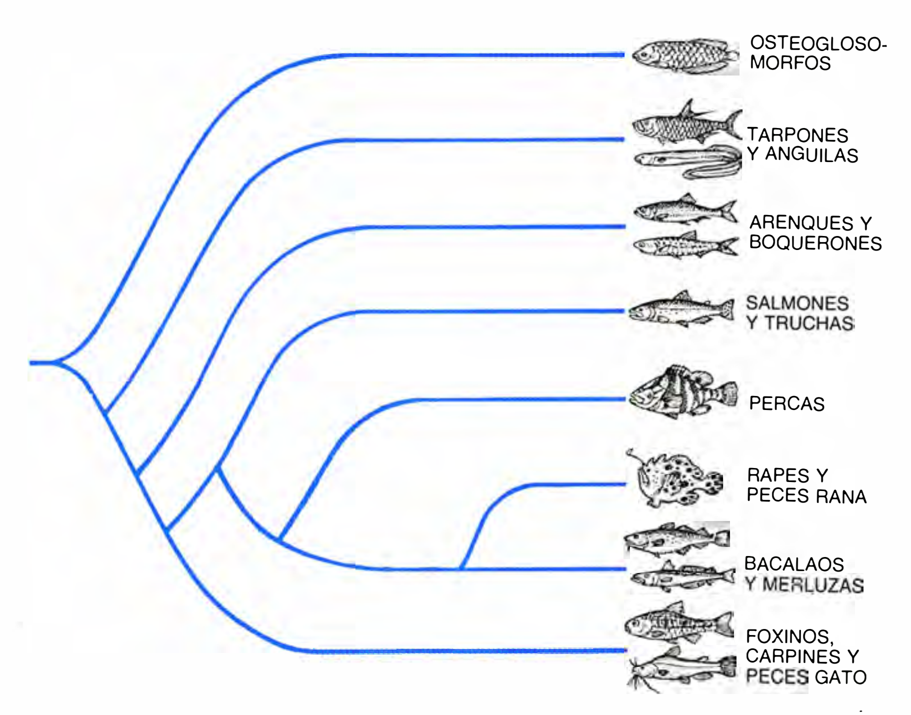
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MECHANICS OF THE FEEDING ACTION OF VARIOUS TELEOST FISHES. R. McN. Alexander en *Journal of Zoology*, vol. 162, parte 2, págs. 145-156; octubre de 1970.

HIGH-SPEED CINEMATOGRAPHIC EVIDENCE FOR ULTRAFAST FEEDING IN ANTENNARIID ANGLERFISHES. David B. Grobecker y Theodore W. Pietsch en *Science*, vol. 205, n.º 4411, págs. 1161-1162; 14 de septiembre de 1979.

THE "LIE-IN-WAIT" FEEDING MODE OF A CRYPTIC TELEOST, *SINANCEIA VERRUCOSA*. D. B. Grobecker en *Environmental Biology of Fishes*, vol. 8, n.º 3/4, págs. 191-202; 1983.

FROGFISHES OF THE WORLD: SYSTEMATICS, ZOOGEOGRAPHY, AND BEHAVIORAL ECOLOGY. Theodore W. Pietsch y David B. Grobecker. Stanford University Press, 1987.



9. ESQUEMA de las relaciones evolutivas entre los peces óseos (teleósteos), que indica que los Ceratioideos (rapes y peces rana) están estrechamente emparentados con los Gadoideos (bacalaos y merluzas).

Los superfluidos del ^{3}He

Las curiosas propiedades de este líquido a temperaturas del milikelvin nos muestran el funcionamiento, a escala macroscópica, de la mecánica cuántica. Si descendiéramos al nanokelvin podríamos hallar líquidos más extraños

Olli V. Lounasmaa y George Pickett

A buen seguro, las elevadísimas temperaturas que imperaban al inicio del universo quedarán siempre fuera del alcance de los mayores aceleradores de partículas. Por contra, los investigadores de física de bajas temperaturas sí han superado, y en mucho, la naturaleza. En los 15.000 millones de años que han transcurrido desde la gran explosión, ningún punto del universo conoció una temperatura por debajo de los tres kelvin (la temperatura del fondo cósmico de microondas); en los laboratorios, sin embargo, se han alcanzado temperaturas del orden del nanokelvin y picokelvin. Los fenómenos que se presentan a tales temperaturas, nuevos para los físicos, no han sucedido nunca en la historia del cosmos.

De cuantos fenómenos insólitos se ponen de manifiesto a temperaturas ultrabajas, quizás el más espectacular sea la superfluidez —el movimiento de un fluido sin rozamiento— y su análogo electrónico, la superconductividad. La superfluidez del ^{4}He líquido se conoce desde 1938. En 1972, Douglas D. Osheroff, Robert C. Richardson y David M. Lee, de la Universidad de Cornell, encontraron que también el ^{3}He, otro isótopo raro, podía tornarse superfluido. El estudio de las propiedades de esa nueva clase de materia ha constituido el tema central de la física de temperaturas ultrabajas a lo largo de los últimos quince años.

El ^{3}He superfluido puede mostrar un comportamiento muy complejo, a pesar de su sencillez estructural: la de un líquido simple, compuesto de átomos idénticos de un gas inerte, químicamente inactivo. Amén del interés que por sí mismo encierra, semejante combinación de lo sencillo y lo complejo convierte al ^{3}He superfluido en sustancia ideal en la que estudiar otros muchos problemas de materia condensada, que van desde las propiedades de las estrellas de neutrones hasta las de los superconductores de altas temperaturas.

Sometido a bajas temperaturas, el helio es un "líquido cuántico". Dicho de otro modo, la mecánica cuántica desempeña un papel importante, no sólo en sus propiedades microscópicas, sino también en su comportamiento macroscópico. La naturaleza superfluida del helio surge de la relación entre la mecánica cuántica, que impone un mínimo de incertidumbre fundamental en el comportamiento de los átomos componentes, y la tercera ley de la termodinámica, que exige que una sustancia se vaya ordenando perfectamente conforme su temperatura se va aproximando al cero absoluto. A altas temperaturas, las sustancias adquieren forma gaseosa y sus átomos se mueven al azar; cuando la temperatura baja, la sustancia se condensa en un líquido y, luego, si sigue descendiendo, se congela en un sólido, en el que la posición de cada átomo debe quedar fija.

Desde el ángulo cuántico, el principio de incertidumbre de Heisenberg establece que el momento y la posición de una partícula no pueden conocerse, simultáneamente, con precisión; la medición de uno produce incertidumbre en la otra. Los átomos de helio son muy ligeros e interaccionan poco; en consecuencia, sus posiciones son bastante inciertas, incluso en el cero absoluto. A bajas presiones no se mantienen fijos, ni forman, pues, un sólido, debido a su gran movimiento en el punto cero.

Encontramos así un cuadro un tanto paradójico: los átomos de helio superfluido siguen siendo líquidos incluso a las temperaturas más bajas; pero, a diferencia de lo que acontece con los líquidos ordinarios, cuyo movimiento fluido es signo de desorden interno, el helio líquido a baja temperatura guarda un orden perfecto, aunque sutil.

El orden especial que ofrece el helio líquido es una consecuencia de la división fundamental que existe en la mecánica cuántica entre los fermiones (así llamados en honor de Enrico Fermi) y los bosones (en homenaje a Satyendra Nath Bose). Los bosones comprenden partículas transmisoras de fuerzas, tales como los fotones y los piones. Su espín es múltiplo entero del cuanto fundamental del momento angular, $\hbar$, la constante de Planck dividida por 2π. Un estado cuántico puede estar ocupado por cualquier número de bosones simultáneamente. Lo que quiere decir que, en el cero absoluto, todos los bosones de un sistema dado pueden condensarse en un solo estado cuántico de mínima energía.

Son fermiones las partículas cuyo espín es múltiplo semientero (1/2, 3/2, etcétera) de $\hbar$; así, electrones, protones y neutrones. Se trata de las partículas constituyentes de la materia. En un instante dado, sólo un fermión puede ocupar un estado cuántico determinado; ello descarta la condensación de todas las partículas en el mismo nivel mínimo.

El átomo de ^{4}He consta de dos electrones, dos protones y dos neu-

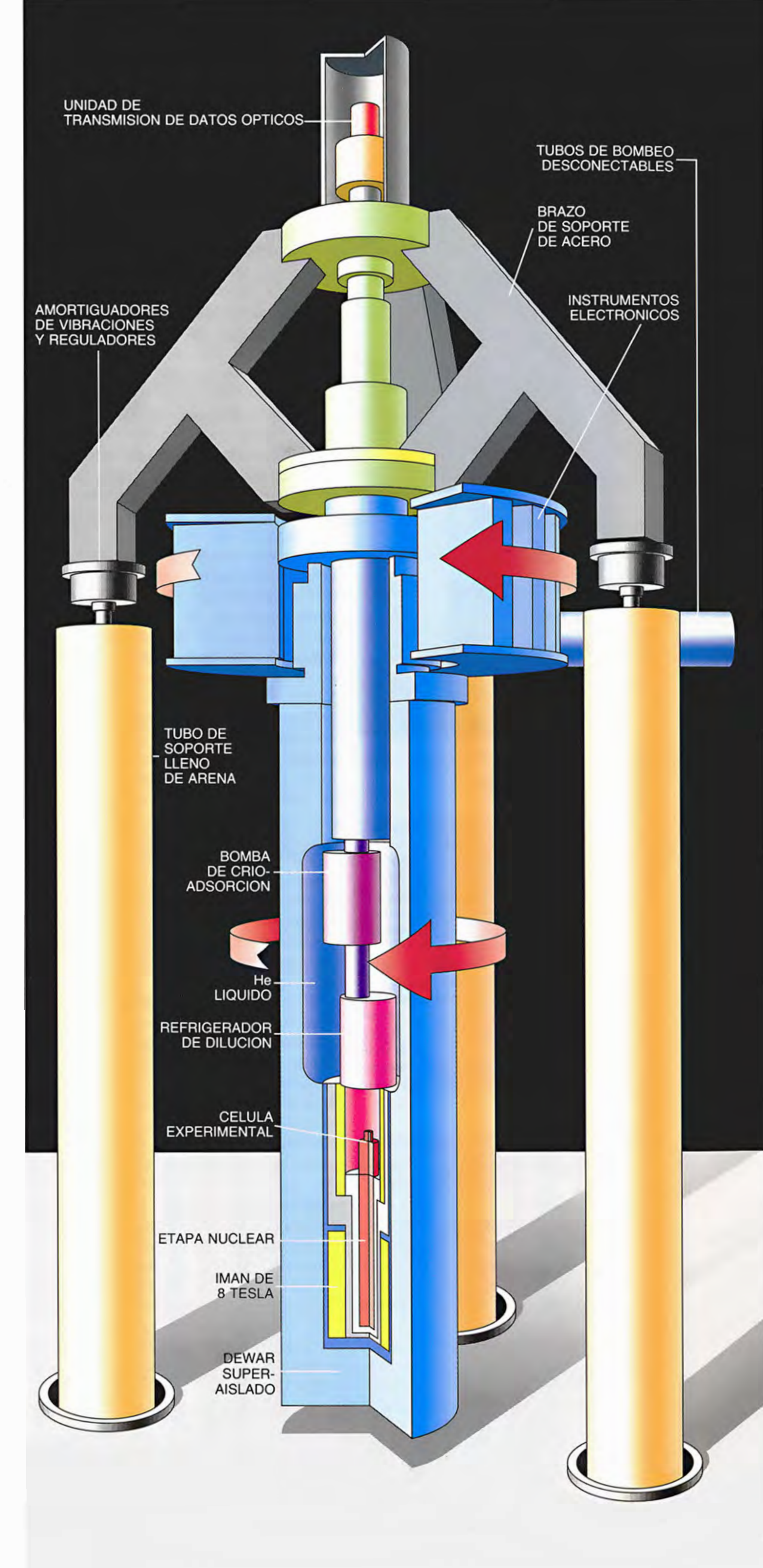
OLLI V. LOUNASMAA y GEORGE PICKETT estudian el comportamiento de los materiales a temperaturas de milikelvin y microkelvin. Lounasmaa es profesor de investigación de la Academia de Finlandia y director del laboratorio de bajas temperaturas de la Universidad Politécnica de Helsinki; sus intereses de trabajo abarcan la criogenia, la física de las temperaturas ultrabajas y la magnetoencefalografía (estudio del cerebro mediante sondas magnéticas de alta sensibilidad). Pickett enseña física de bajas temperaturas en la Universidad de Lancaster e investiga en las técnicas experimentales que operan cerca del cero absoluto. En 1979, fundó con sus colaboradores Tony Guénault e Ian Miller el laboratorio del microkelvin de Lancaster.

trones, cada uno con espín semientero. El átomo es, pues, un bosón. Cuando el ^{4}He se enfría por debajo de una temperatura crítica, el denominado punto lambda (2,17 kelvin, a presión nula), el líquido empieza a condensarse en el estado energético más bajo. A temperaturas ultrabajas, casi todo el líquido se encuentra en ese estado, y basta una función de onda mecánico-cuántica para describir, no sólo el comportamiento de las distintas partículas, sino también el de todo el líquido macroscópico.

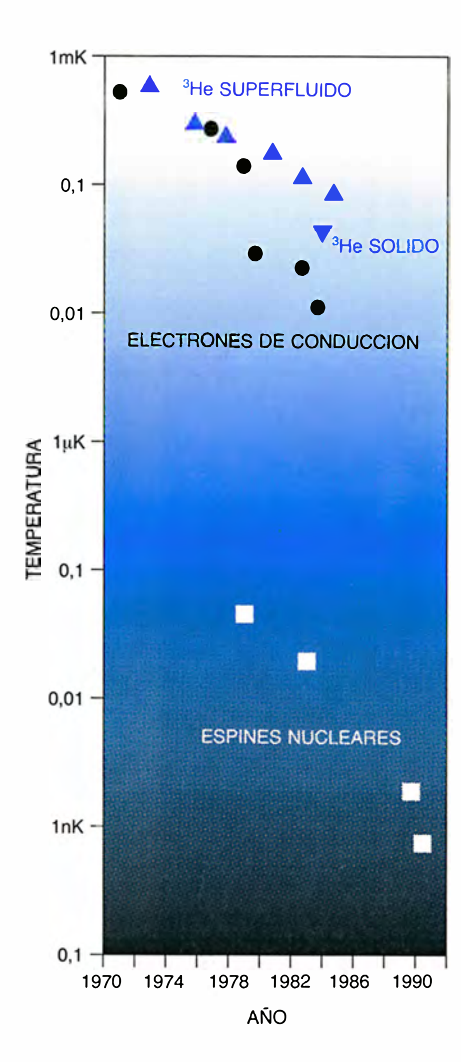
Además, se requiere una cantidad importante de energía y momento para catapultar el líquido hasta un estado excitado. Condición ésta que produce la superfluidez. En un fluido normal, las colisiones entre átomos, o entre los átomos y las paredes del recipiente, pueden provocar fácilmente que un átomo pase de un estado energético a otro estado de casi igual energía y debilitar el flujo del fluido. Ahora bien, el helio líquido en estado fundamental no puede saltar a otro estado mediante colisiones de baja velocidad. No hay ningún mecanismo para disipar energía.

La superfluidez del ^{3}He posee un carácter algo distinto. Sus átomos contienen un número impar de neutrones y, por tanto, un número impar de partículas en total. Son fermiones e incapaces de condensarse en un estado fundamental común. En consecuencia, el ^{3}He no puede hacerse superfluido con la facilidad de su compañero bosónico. Antes bien, a una temperatura de transición unas 1000 veces más baja que la del ^{4}He, comienza a manifestarse una débil atracción entre los átomos de ^{3}He. Los átomos, de momentos iguales y opuestos, tienden a formar pares cuyas partículas desarrollan órbitas recíprocas a cierta distancia. Estos pares de Cooper (así llamados en honor de Leon N. Cooper, hoy en la Universidad de Brown, quien propuso un apareamiento análogo de electrones para explicar la superconductividad) son bosones; sus momentos angulares semienteros, sumados, dan un valor entero. Por tanto, pueden condensarse en un estado fundamental común y crear un superfluido.

Forman, de hecho, dos superfluidos: ^{3}He-A y ^{3}He-B. En la fase A los espines nucleares de los dos átomos



1. CRIOSTATO EN ROTACION para crear vórtices en el ^{3}He superfluido. El ingenio, que mide tres metros, se halla instalado en la Universidad Politécnica de Helsinki. Gira a 30 revoluciones por minuto. Además de alojar el helio líquido, contiene sondas experimentales y un sistema de enfriamiento de varias etapas.



2. REGISTROS DE BAJAS TEMPERATURAS alcanzados en el ^{3}He, que debe enfriarse por contacto con otras sustancias, en los electrones de metales enfriados por ordenamiento magnético y en núcleos de metal considerados en sí mismos. Las temperaturas más bajas en ^{3}He líquido (unos 100 microkelvin) se han alcanzado en Lancaster. (El grupo de Hidehiko Ishimoto, de la Universidad de Tokio, ha enfriado ^{3}He sólido hasta 43 microkelvin.) El grupo de Lancaster ha enfriado también electrones de conducción del cobre a 12 microkelvin, un récord igualado por el grupo de Frank D. M. Pobell, de Bayreuth. En febrero de 1990, Pertti J. Hakonen y Shi Yin, de Helsinki, hicieron bajar la temperatura nuclear de una muestra de plata hasta 800 picokelvin.

tienden a colocarse perpendicularmente al eje del movimiento orbital, mientras que en la fase B la correlación es más sutil.

Por hallarse en el mismo estado todos los pares del ^{3}He, las relaciones entre el espín y el movimiento orbital se refieren no sólo a los pares individuales, sino también al superfluido entero. El ^{3}He superfluido presenta, por tanto, direccionalidad, a la manera de un cristal líquido; puede alinearse mediante factores externos, tales como campos magnéticos, flujo líquido o superficies. La disposición espacial de estas direcciones en el líquido recibe el nombre de textura. (Los átomos de ^{4}He carecen de espín y, por tanto, de propiedades direccionales especiales; así, pues, el ^{4}He superfluido no presenta textura.)

El comportamiento de los superfluidos difiere del comportamiento de los fluidos convencionales en grado y en especie. Advertiremos una notable anomalía en cuanto intentemos rotar un superfluido. Un líquido normal introducido en un cubo que esté girando a velocidad constante girará con la misma velocidad angular que el cubo, como si fuera un cuerpo sólido. La velocidad y, por tanto, el momento del líquido, es proporcional a la distancia radial al eje de rotación.

Por su condición de líquido cuántico, el helio superfluido no girará, sin embargo, como un cuerpo sólido. La rotación uniforme exige que la velocidad —y también el momento— del líquido aumente linealmente con la distancia al eje de rotación. El momento y la longitud de onda son inversamente proporcionales entre sí; por consiguiente, las funciones de onda cuánticas de los átomos de la parte externa del líquido deben tener longitudes de onda más cortas que la de los átomos cercanos al eje de rotación. Esto es del todo viable cuando hablamos de los átomos de un líquido normal, porque cada uno posee su propia longitud de onda. Pero el conjunto de los átomos de una muestra de helio superfluido viene descrito por una única función de onda mecánico-cuántica y resulta imposible, desde el punto de vista geométrico, construir una representación circular de crestas y vientres cuyo espaciado disminuya al aumentar el radio. El helio superfluido permanece en un estado no rotante con respecto al universo global.

Sí es posible una función de onda cuya longitud de onda crezca al aumentar el radio. Tal esquema corresponde al movimiento de un líquido alrededor de un remolino o vórtice. El flujo es más rápido en el centro y disminuye conforme aumenta el radio. De hecho, si se hace girar un recipiente que contenga helio superfluido, aunque procedamos a velocidad angular relativamente baja, se romperá el estado estacionario del líquido y se formarán pequeños vórtices. La rotación, en vez de distribuirse uniformemente por el líquido como ocurre en el movimiento de un cuerpo sólido, se introduce en aquél por las líneas de vórtice. La interacción mutua entre vórtices y de éstos con las paredes del recipiente crean rozamiento; el líquido pierde así superfluidez.

El flujo circulante asociado a cada uno de estos minúsculos remolinos repele a sus vecinos, de manera que los vórtices forman una red hexagonal regular. A una velocidad angular de 12 revoluciones por minuto, usual en la experimentación, la distancia entre vórtices es de unos 0,2 milímetros. (La red de vórtices en el ^{4}He ha sido fotografiada directamente por Richard E. Packard y sus colaboradores, de la Universidad de Berkeley.)

Se forman fácilmente vórtices en volúmenes de superfluido abiertos. Pero, si confinamos el superfluido en un recipiente lleno de pequeñas partículas —como se hace a veces para poner de manifiesto la desaparición de la viscosidad del fluido—, inhibiremos la creación de vórtices. El líquido podrá fluir entre las partículas sin fricción, pero no quedará espacio para que se desarrolle un flujo circulante. Y nos encontraremos ante una situación paradójica: cuanto más finos sean los poros por los que deba circular el superfluido, más deprisa podrá fluir.

Los vórtices de superfluido de ^{4}He revisten particular interés; pero la estructura interna del ^{3}He superfluido genera vórtices que muestran un comportamiento aún más complejo. El estudio experimental de tales fenómenos no carece, sin embargo, de dificultades. Amén de enfriar las muestras hasta el milikelvin, o por debajo, deben hacerse girar para producir los vórtices. Hasta ahora, los investigadores sólo han logrado solucionar el problema promoviendo el giro de todo el aparato experimental.

Buena parte de los datos referentes a los vórtices de ^{3}He se ha obtenido en el criostato ROTA 1 de Helsinki, que está en funcionamiento desde 1981. Alcanza velocidades de rotación de hasta 30 revoluciones por minuto y temperaturas de sólo 0,6 milikelvin. Una versión mejorada, el ROTA 2, entró en funcionamiento en 1988. En el proyecto ROTA participan la Academia de Finlandia y la Academia Soviética de Ciencias. Han intervenido muchos en el experimento; entre otros, citaremos a M. Peter Berglund, Yuri M. Bun'kov, Devi Garibashvili, Pertti J. Hakonen, Olli T. Ikkala, Seppo T. Islander, Matti Krusius, Olli V. Lounasmaa, Yuri Mukharsky, Kaj K. Nummila, Jukka P. Pekola, Riita H. Salmelin, Juha T. Simola, Ladislav Skrbek y Jelil S. Tsakadze. Las contribuciones teóricas de Martti M. Salomaa, Grigory E. Volovik y sus colaboradores resultaron decisivas para el éxito del mismo.

Se han empleado cuatro métodos experimentales distintos para investigar el comportamiento del ^{3}He dentro del criostato giratorio: resonancia magnética nuclear (RMN); el girosco-

pio de corriente alterna (c.a.), que mide cambios en el momento angular del superfluido; movilidad iónica, utilizada a modo de sonda sensible a la estructura del fluido; y ultrasonidos, cuya atenuación depende de la textura del líquido.

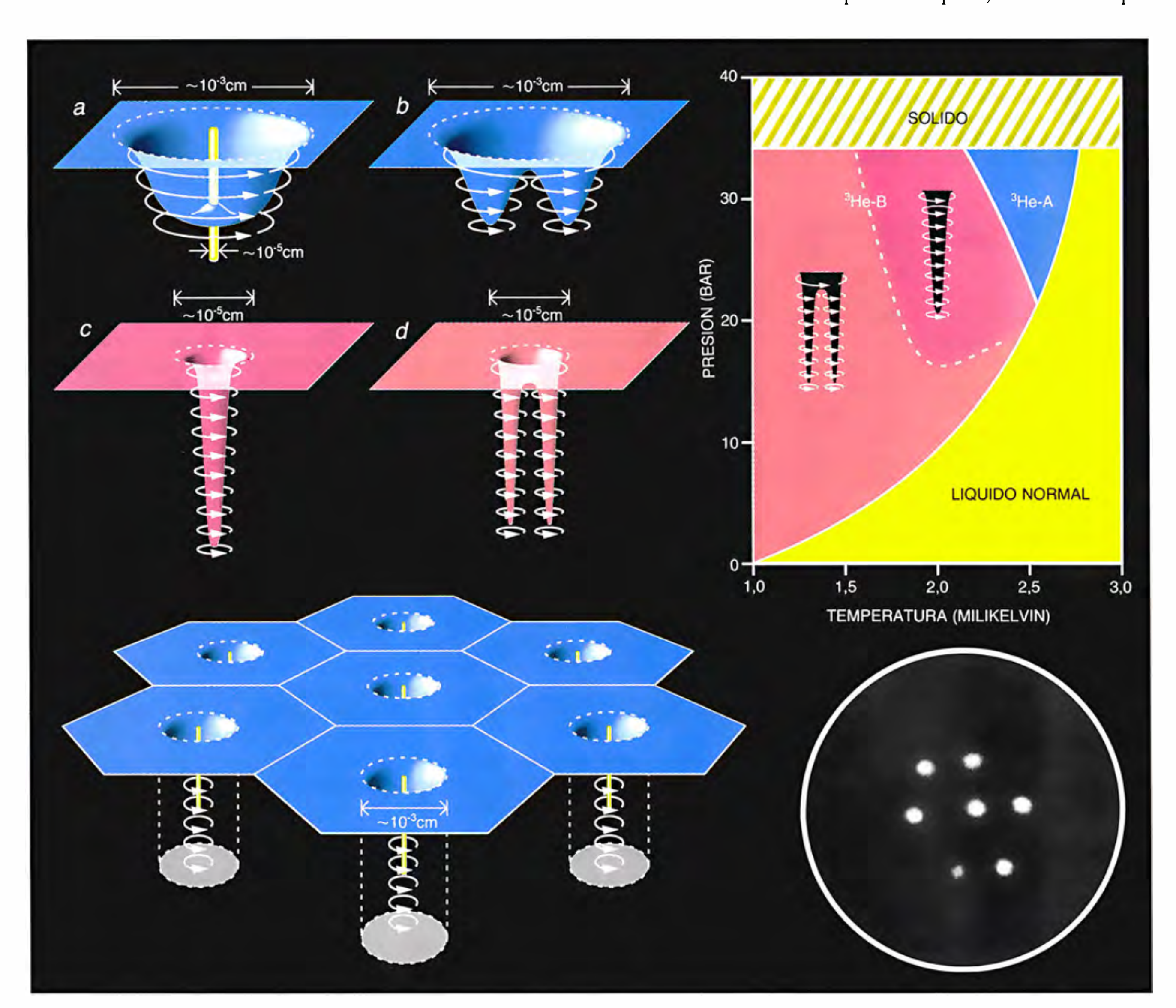
La mayor parte de lo que se conoce sobre los efectos de la rotación en el ^{3}He superfluido se ha averiguado gracias a la RMN: el ^{3}He en rotación se somete a un campo magnético estacionario que causa la precesión de los ejes de rotación de los núcleos. Se recurre a una señal de radiofrecuencia para invertir los espines nucleares. Las frecuencias específicas que provocan la inversión de los espines dependen de las interacciones entre los átomos de ^{3}He.

Los iones negativos ofrecen información relativa a la textura del ^{3}He superfluido —la alineación macroscópica de los espines y los ejes orbitales de los pares de Cooper. Su movimiento en el fluido bajo la influencia de un campo eléctrico depende estrechamente de la orientación del campo y de la textura del superfluido.

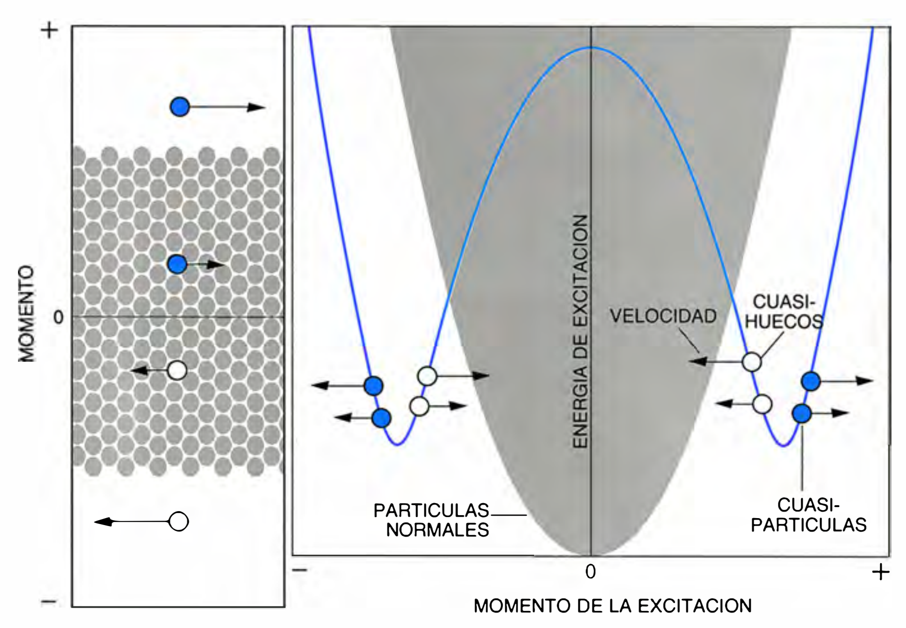
De manera similar, la atenuación de los ultrasonidos constituye una sonda sensible para determinar la textura de los ^{3}He superfluidos. Los ultrasonidos aportan la ventaja de que pueden utilizarse en todos los campos magnéticos. Se han realizado experimentos sistemáticos de ultrasonidos en el criostato ROTA 2 para estudiar los vórtices del ^{3}He-A en campos magnéticos débiles, e incluso en otra fase superfluida, ^{3}He-A_1, que se forma en campos magnéticos intensos.

El giroscopio de c.a., en cuyo experimento participó Packard, ha servido para medir las propiedades del flujo de ^{3}He. El giroscopio consta de un toro horizontal lleno de ^{3}He y polvos de plástico (a fin de resaltar el flujo superfluido), junto con un mecanismo que hace vibrar el toro e instrumentos que calibran la respuesta del superfluido.

A la hora de acometer un experimento de giroscopio se comienza por enfriar la muestra de ^{3}He por debajo de la temperatura de transición superfluida, manteniendo el superfluido en reposo. Después, el criostato que



3. ENTRE LAS PROPIEDADES EXCLUSIVAS del ^{3}He superfluido citaremos la formación de, por lo menos, cuatro clases diferentes de vórtices cuando gira el fluido. Las propiedades mecánico-cuánticas del líquido impiden que gire en bloque, como lo harían los fluidos normales. Un diagrama de fases (*arriba, a la derecha*) ilustra las condiciones de formación de los vórtices. El ^{3}He-A puede desarrollar vórtices con núcleos sencillos (*a*) o dobles (*b*). El tipo de vórtice que nazca dependerá de la historia del enfriamiento de la muestra. El vórtice de núcleo sencillo es discontinuo: un hilillo de fluido ordinario atraviesa su centro. La fase B también desarrolla vórtices de núcleo sencillo (*c*) y doble (*d*). Los diámetros de los vórtices del ^{3}He-B son mucho menores que los de la fase A; los dos vórtices de la fase B son discontinuos. Los flujos de líquido que constituyen los vórtices individuales tienden a repelerse mutuamente, y de esa manera los vórtices se disponen en redes hexagonales estables (*abajo*). Richard E. Packard, de la Universidad de California en Berkeley, ha fotografiado una de esas redes en ^{4}He, que sólo permite una clase de vórtices (*abajo, a la derecha*).



4. ATOMOS SIN APAREAR del ^{3}He líquido. Forman cuasipartículas y cuasihuecos. La mayoría de los átomos se hallan ligados en pares de Cooper superfluidos (*gris*). Los átomos sin aparear se asocian con huecos (estados vacíos que quedarían ocupados por el otro átomo en el par de Cooper). Cuando el momento de los átomos sin aparear es alto, éstos se manifiestan como cuasipartículas; cuando es bajo, los átomos se pierden en la multitud y en cambio se manifiestan sus huecos.

contiene el toro (en el que se encuentra el ^{3}He y el polvo de plástico) gira durante un minuto, a una velocidad comprendida entre una y 20 revoluciones por minuto. A lo largo de los cinco minutos subsiguientes al final de la rotación, los experimentadores registran la amplitud de las vibraciones en torno al eje vertical; estas vibraciones se deben a la precesión del superfluido que gira en el toro y constituyen una medida del momento angular.

A velocidades de rotación bajas no hay momento angular alguno en el anillo después de que se haya detenido el criostato. Cuando éste gira lentamente, el superfluido se desliza sin fricción entre los poros del polvo de plástico del toro. Sin embargo, por encima de una velocidad crítica de dos o tres revoluciones por minuto, comienzan a formarse vórtices; el superfluido es arrastrado y empieza a girar. Tras la parada del criostato, persiste cierto momento angular en el toro.

Entre los primeros experimentos realizados con el giroscopio, uno fue comprobar la genuina superfluidez del ^{3}He líquido. Se hizo que el criostato girase a su velocidad máxima, a fin de crear un momento angular grande en el interior del giroscopio de c.a.; se detuvo entonces y se midió el momento angular. Después de mantener el criostato en reposo durante 48 horas, estando su temperatura aún por debajo del punto de transición al superfluido, se midió de nuevo el momento angular del líquido en el toro. El momento angular del ^{3}He-B permaneció constante dentro del diez por ciento de margen de error de los experimentos. De ese estudio se dedujo que la resistencia opuesta al flujo era, por lo menos, un billón de veces inferior a la que sufría el ^{3}He líquido normal, sometido a la misma temperatura.

Es imposible demostrar por vía experimental que el ^{3}He-B no ofrece ninguna resistencia a fluir, pero estos resultados muestran, más allá de toda duda razonable, que el ^{3}He-B es un verdadero superfluido, y no un líquido normal con una viscosidad muy baja. Peter L. Gammel, hoy en los Laboratorios AT&T Bell, y John D. Reppy, de la Universidad de Cornell, utilizaron un dispositivo experimental algo distinto y observaron supercorrientes persistentes en el ^{3}He-A.

En otros experimentos hemos investigado en Helsinki detalles adicionales del comportamiento de los vórtices. La velocidad crítica a partir de la cual empiezan a formarse vórtices y a la que el superfluido de fase B es arrastrado por el giroscopio rotante, sufre un cambio abrupto a ciertas temperaturas y presiones. A una presión de 23 bar y temperatura por debajo de 1,7 milikelvin, la velocidad crítica es de 7,1 milímetros por segundo, mientras que a una temperatura ligeramente más elevada es de sólo 5,2. Parece que este cambio repentino de propiedades obedece a la formación de distintos tipos de vórtices en el ^{3}He-B. El grupo de Helsinki ha descubierto cuatro tipos de vórtices distintos en el ^{3}He superfluido, dos en el ^{3}He-A y otros dos en el ^{3}He-B; por mor de comparación, en el ^{4}He sólo hay un tipo.

En la fase A del ^{3}He, una de las clases de vórtices es singular —tiene una discontinuidad en su centro donde la velocidad del flujo cambia bruscamente de dirección— mientras que el otro tipo de vórtices, que tiene un núcleo doble, es continuo. En la fase B, ambos tipos de vórtices son singulares (hay una discontinuidad en el campo de velocidades en el centro). Según análisis teóricos, muy refinados, de Erkki V. Thuneberg, de la Universidad de Helsinki, y, luego de Salomaa y Volovik, los vórtices que se forman a una velocidad crítica más baja poseen un solo núcleo cilíndrico y simétrico en torno al cual fluye el líquido, mientras que los vórtices que se crean a velocidad crítica más alta presentan un núcleo doble.

Incluso en estado de reposo, el ^{3}He presenta excitaciones, que se hallan asociadas a los átomos que no están ligados formando pares de Cooper. Asociada a cada átomo desapareado hay una partícula ficticia –un "hueco"– representada por el estado vacío del átomo que se habría apareado de haberse encontrado ocupado el estado. Estas excitaciones combinan las propiedades de partículas y huecos. A momentos elevados, dominan las propiedades de partículas; a momentos bajos, dominan las propiedades características de hueco. De ahí la razón de llamar, a la excitación, cuasipartícula o cuasihueco.

Muchos datos experimentales relativos a la balística de las cuasipartículas en el ^{3}He superfluido se han obtenido gracias al criostato de enfriamiento nuclear construido por Tony M. Guénault y uno de nosotros (Pickett) en la Universidad de Lancaster. Este aparato, que opera desde 1980, puede enfriar el ^{3}He líquido hasta unos 100 microkelvin, temperatura a la que escasean las excitaciones generadas térmicamente. Han contribuido a este trabajo, entre otros, John Carney, Kees Castelijns, Kenneth Coates, Shaun Fisher, Christopher Kennedy, Vepan Keith, Ian Miller, Simon Musset, Gregory Spencer y Martin Ward. La etapa de enfriamiento nuclear de esta máquina resulta insólita en el sentido de que los elementos de enfriamiento de cobre están inmersos directamente en la muestra de ^{3}He líquido, lo que proporciona un contacto térmico óptimo.

Para el estudio de las muestras enfriadas en el criostato se ha recurrido a un dispositivo tan sencillo cuan versátil: una hebra de alambre supercon-

ductor formando un semicírculo y sujeto por ambos extremos [*véase la figura 5*]. (Lo ingeniaron Mervyn Black, Henry Hall y Keith Thompson.) Si se coloca el alambre en el seno de un campo magnético de baja intensidad, la corriente que lo atraviese hallará una fuerza, y el alambre experimentará un empuje lateral.

Una corriente alterna de la frecuencia adecuada puede provocar que el alambre oscile a su frecuencia de resonancia natural. Además, cuando el alambre se mueve en el campo, genera una diferencia de potencial proporcional a su velocidad. Enviando una corriente a través del alambre, éste se pondrá en movimiento; la respuesta se advierte al fijarse en el voltaje resultante. Este simple dispositivo se ha convertido en la sonda universal, a temperaturas muy bajas, del laboratorio de Lancaster.

A velocidades muy bajas, el alambre se mueve por el superfluido sin disipar apenas energía. El único rozamiento que se experimenta es el producido por efectos internos del alambre y de su circuitería asociada, amén de por las colisiones con las cuasipartículas. La cuantía del amortiguamiento es, pues, proporcional al número de excitaciones en el líquido.

Ahora bien, el número de cuasipartículas cambia con la temperatura; por tanto, el alambre puede servirnos de termómetro. Esa posibilidad de medir directamente la temperatura del líquido a las temperaturas más bajas reviste una importancia obvia. Es casi imposible obtener otro material termométrico que mantenga buen contacto térmico con el ^{3}He líquido a 100 microkelvin, por la sencilla razón de que la densidad de las excitaciones –partículas que el termómetro puede medir– en el superfluido viene a ser como un vacío muy elevado a temperatura ambiente.

Además de constituir punto menos que el único dispositivo capaz de medir directamente la temperatura del ^{3}He, el termómetro alámbrico se distingue por su sensibilidad. El amortiguamiento cae en unos cinco órdenes de magnitud entre la temperatura de la transición superfluida y las temperaturas más bajas a las que puede enfriarse el ^{3}He.

Pero hay algo más importante que la propia capacidad del alambre para determinar la temperatura del ^{3}He líquido: su capacidad para analizar la estructura del líquido. En el ^{3}He superfluido, los átomos se hallan ligados en pares de Cooper; cuando la velocidad máxima del anillo supera los 10 milímetros por segundo, el alambre suministra energía suficiente para romper un par en dos átomos o cuasipartículas. A las temperaturas más bajas y a velocidades pequeñas, el movimiento del alambre en el seno del líquido no sufre apenas rozamiento. Sin embargo, una vez que el alambre alcanza la velocidad crítica, la fuerza de rozamiento crece bruscamente unos órdenes de magnitud, aunque la velocidad sólo aumenta en un pequeño porcentaje. Por ser, a la velocidad crítica, tan drástico el cambio en el amortiguamiento, cualquier flujo anómalo de líquido en torno al alambre (que alteraría la velocidad aparente del alambre) varía notablemente el punto donde surge el amortiguamiento.

La rotura de pares proporciona también una fuente controlable de cuasipartículas y cuasihuecos producidos por vía artificial. A tenor de la explicación más sencilla del proceso de rotura de pares, propuesta por Philip Stamp, físico canadiense, el alambre actúa de foco móvil, que emite un haz de cuasipartículas hacia adelante y otro de cuasihuecos hacia atrás. No muy por debajo de la temperatura de transición superfluida existe una gran porción de partículas sin aparear, siendo muy corto el recorrido libre medio entre colisiones. Cualquier "viento" de cuasipartículas acabará rápidamente dispersado y disipado por las colisiones con las cuasipartículas y cuasihuecos existentes en el fluido. Pero si la temperatura cae hasta la décima parte de la temperatura de la transición superfluida, sólo una partícula de cada millón quedará sin aparear; la probabilidad de colisiones será entonces tan baja que las partículas del viento podrían recorrer un kilómetro o más sin chocar.

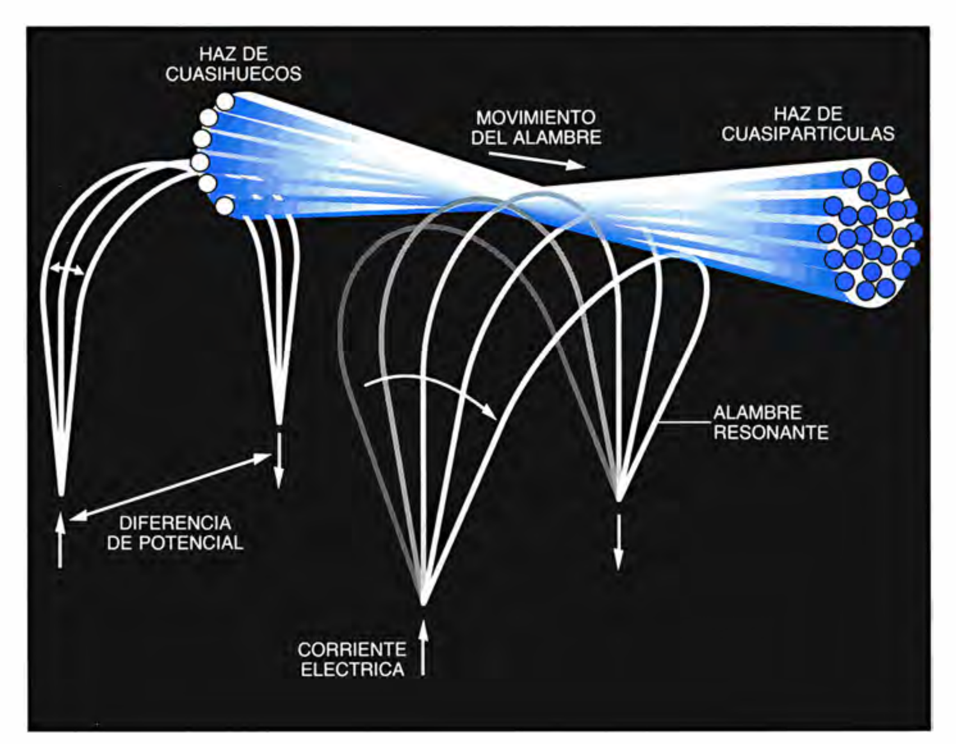
Los experimentos a bajas temperaturas han confirmado la corrección, en líneas generales, de ese esquema. Cuando se sumerge un segundo alambre en el ^{3}He líquido, las cuasipartículas y los cuasihuecos emitidos por el primer alambre ejercen una fuerza sobre el segundo, poniéndolo en movimiento y generando una diferencia de potencial. El segundo alambre experimenta una fuerza directamente proporcional al número de excitaciones que recibe. A su vez, el número de partículas del viento es proporcional a la energía disipada por el primer alambre. La energía cedida al primer alambre se transforma en excitaciones, al no haber ningún otro mecanismo de disipación de la misma. Atendiendo a la distribución angular de las cuasipartículas emitidas, hemos logrado confirmar también que el haz es estrecho.

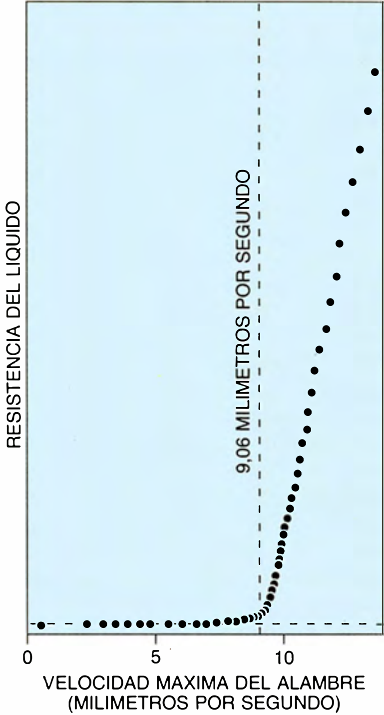
Quedan todavía cabos sueltos. Por moverse el alambre hacia adelante y hacia atrás, el haz pulsante de excitaciones emitidas debe consistir en chorros alternativos de cuasipartículas y cuasihuecos. Cuando una cuasipartícula se dispersa por una superficie en un proceso normal, debe invertirse su momento, y comunicar así un empuje al reflector. Por contra, un cuasihueco, cuyo momento y velocidad apuntan en direcciones opuestas, comunica un tirón al reflejarse. Sin embargo, el alambre detector experimenta un empuje, recibe un chorro de cuasipartículas o de cuasihuecos.

Para entender la razón de ello precisamos conocer mejor la naturaleza de las partículas y los huecos del ^{3}He. La noción de hueco parte de la naturaleza del nivel energético más bajo, o estado fundamental, de un sistema de partículas. En el estado de energía más bajo de un sistema de fermiones, por ejemplo, las partículas llenan todos los estados hasta cierto nivel energético, determinado por el número de partículas; cada fermión debe ocupar, en efecto, un estado distinto. Todos los niveles energéticos superiores se hallan vacíos. A ese estado fundamental los teóricos de campos lo denominan vacío, pues mientras todos los estados de niveles inferiores permanezcan llenos y ninguna partícula ascienda a un nivel desocupado, nada puede interaccionar con él.

Si se arranca un fermión de uno de los estados ocupados y se le coloca en otro estado de mayor energía, la situación cambia bastante. En el nivel energético más alto la partícula puede ahora interaccionar con varias fuerzas y deja tras de sí un estado cuántico desocupado: un hueco. La partícula y el hueco se comportan de forma sustancialmente distinta. Empuje la partícula y ésta se alejará. Su momento y energía aumentan o disminuyen a la vez. Sin embargo, los huecos hacen lo contrario. Empuje un hueco y éste se aproximará. Su momento disminuye si aumenta su energía, y viceversa. El hueco se comporta como si tuviera una masa negativa; de hecho es una partícula ausente, de manera que, en cierto sentido, tiene masa negativa.

Las partículas sin aparear del ^{3}He superfluido encierran un interés singular. Los pares de Cooper que constituyen la parte superfluida –el estado fundamental– del líquido constan de partículas apareadas que poseen momentos opuestos. En virtud de ello, los átomos sueltos se acoplan con un hueco de momento opuesto o, si se prefiere, con un estado desocupado que correspondería a una partícula de momento opuesto. Ello determinará un comportamiento insólito.





5. BUCLE DE ALAMBRE SUPERCONDUCTOR puesto en movimiento por la corriente y el campo magnético para romper los pares de Cooper superfluidos y crear haces de cuasipartículas y cuasihuecos (*izquierda*). Un segundo bucle puede detectar el viento de cuasipartículas resultante, cuyo movimiento proporciona datos sobre la estructura del superfluido. La rotura de pares aumenta cuando el alambre supera cierta velocidad (*derecha*).

Para una partícula normal, la relación entre energía y momento es sencilla. Ambos aumentan y disminuyen a la vez. Pero no es tan sencilla la situación de las cuasipartículas de ^{3}He. Un átomo suelto cuyo momento es alto sobresale porque otros estados de momento alto están desocupados, mientras que el hueco asociado (un estado sin átomo) es indistinguible de otros estados desocupados de momento elevado. La combinación partícula-hueco guarda un estrecho parecido con una partícula real; su energía crece con el momento. Por contra, un átomo sin aparear cuyo momento es bajo resulta indistinguible de la miríada de partículas apareadas de momento bajo; se distingue más el hueco de bajo momento (moviéndose en dirección opuesta a la de la partícula). La energía del hueco aumenta cuando su momento disminuye. Entre estos dos extremos hay un punto en el que la energía de la combinación partícula-hueco se torna mínima y su velocidad se anula.

La dirección de la velocidad de una cuasipartícula de bajo momento (cuando se manifiesta como hueco) es opuesta a su dirección a alto momento (cuando se manifiesta como partícula). Por consiguiente, la cuasipartícula que penetre en una región donde exista una fuerza que se oponga a su movimiento, irá perdiendo energía gradualmente hasta que su velocidad se anule. Comienzan entonces a predominar sus propiedades de hueco, se invierte su velocidad y vuelve por donde había venido. En efecto, la fuerza convierte suavemente la cuasipartícula en cuasihueco, y viceversa. Este proceso, sin parangón en la dispersión de partículas normales, se conoce como reflexión de Andreev, en honor de Aleksander F. Andreev, del Instituto de Problemas Físicos de Moscú, quien sugirió ese mecanismo, aunque en un contexto de superconductores.

La reflexión de Andreev podría explicar por qué el segundo alambre, en el experimento del haz de cuasipartículas, siente un empuje provocado por las cuasipartículas y los cuasihuecos. Cuando las cuasipartículas se convierten en cuasihuecos por la reflexión de Andreev en el segundo alambre, éste experimenta un empuje; el alambre sufre también el empuje cuando los cuasihuecos se convierten en cuasipartículas. En nada se parece esto al proceso normal, donde los dos tipos de excitaciones producen efectos opuestos.

El dispositivo de los dos alambres sirve para algo más que mostrar el extraño comportamiento de cuasipartículas y cuasihuecos. Proporciona todos los componentes necesarios para estudiar la dinámica de las cuasipartículas en el ^{3}He superfluido. Posee una fuente y un detector y todo el sistema funciona a unos 100 microkelvin de temperatura.

Los estudios de laboratorio sobre el comportamiento del ^{3}He superfluido podrían abrirnos la ventana hacia posibles formas de materia que no se encuentran en parte alguna de la Tierra. Se conjetura, por ejemplo, si la materia neutrónica (neutronio) de los púlsares, en celerísima rotación, no será superfluida, a pesar de que la temperatura en las estrellas de neutrones se cifre en unos 100 millones de kelvin. Por supuesto que la materia neutrónica no puede estudiarse en el laboratorio, pero podría reproducirse su comportamiento mediante ^{3}He o ^{4}He superfluido en rotación. Los neutrones, como los átomos de ^{3}He, son fermiones, y se cree que el neutronio se vuelve superfluido a través del mismo mecanismo de pares de Cooper que interviene en el ^{3}He. Sólo la finura de los cálculos teóricos nos dirá si el grado de correspondencia entre el ^{3}He superfluido y neutronio permite que tales modelos den resultados útiles. Si así fuera, los experimentos con ^{3}He se harán con la mente puesta en las estrellas de neutrones.

¿Podemos esperar hallar más superfluidos en la Tierra? Tenemos un firme candidato en una solución diluida de ^{3}He en ^{4}He superfluido. En razón de la presión aplicada, se pueden crear soluciones que contengan hasta un 10 por ciento de ^{3}He. A temperatura suficientemente baja, los átomos de ^{3}He de la solución deben formar pares de Cooper y volverse superfluidos. No obstante la labor investigadora de varios institutos,

nadie ha observado todavía tal transición. La densidad de átomos de ^{3}He en una solución de esta clase es muy baja y, bastante débiles, las interacciones entre ellos. Las estimaciones de la temperatura de transición se sitúan en el rango del nanokelvin, bastante por debajo de los 80 o 100 microkelvin a los que se han enfriado hasta ahora las soluciones diluidas de ^{3}He en ^{4}He.

La existencia de tal superfluido nos abriría un continente inexplorado de comportamiento atómico. No sólo los átomos de ^{3}He se tornarían superfluidos, sino que el disolvente también sería superfluido. El nuevo sistema tendría dos superfluidos interpenetrantes, aunque independientes. Ese superfluido de dos componentes mostraría un comportamiento aun más extravagante que los de un solo componente conocidos hasta ahora.

Más. La teoría sugiere que, en una solución diluida de ^{3}He, podrían formarse dos clases diferentes de pares de Cooper. La clase dominante en una solución dada dependería de la concentración de ^{3}He. A concentraciones elevadas, los pares se formarían con los espines nucleares de los dos átomos paralelos, lo mismo que en el ^{3}He puro. A concentraciones más bajas, se formarían, en cambio, pares con espines opuestos. A cierta concentración intermedia, podrían coexistir una y otra y crear un superfluido de tres componentes.

Quizás haya que esperar bastante tiempo la verificación experimental de esa posibilidad, toda vez que dicha transición sólo se produce a temperaturas muy por debajo de las necesarias hoy para que el helio líquido se enfríe. Pero esas temperaturas acabarán por alcanzarse. De eso no nos cabe duda.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

VORTICES IN ROTATING SUPERFLUID ^{3}HE. Pertti Hakonen y Olli V. Lounasmaa en *Physics Today*, vol. 40, n.° 2, págs. 70-78; febrero, 1987.

THE BALLISTICS OF QUASIPARTICLES IN ^{3}HE-B AT VERY LOW TEMPERATURES. A. M. Guénault y G. R. Pickett en *Physica Scripta*, vol. T19, págs. 453-457; abril, 1987.

QUANTIZED VORTICES IN SUPERFLUID ^{3}HE. Martii M. Salomaa y G. E. Volovik en *Reviews of Modern Physics*, vol. 59, n.° 3, págs. 533-613; julio, 1987.

MICROKELVIN PHYSICS. G. R. Pickett en *Reports on Progress in Physics*, vol. 51, n.° 10, págs. 1295-1340; octubre, 1988.

VORTICES IN ROTATING SUPERFLUID ^{3}HE. Pertti Hakonen, Olli V. Lounasmaa y Juha Simola en *Physica B*, vol. 160, n.° 1, págs. 1-55; agosto, 1989.

Propiedades de los microagregados metálicos

Pequeños agregados formados por unas pocas decenas o escasos cientos de átomos de elementos metálicos presentan propiedades que difieren bastante del metal macroscópico

M. Pilar Iñiguez y Julio A. Alonso

Las micropartículas metálicas son agregados de unos pocos átomos que, debido a su pequeño tamaño, presentan propiedades diferentes de las del correspondiente metal en el estado sólido usual. Se les llama también microagregados. Mediante el estudio de las micropartículas se sigue el crecimiento de la materia desde la fase gaseosa hasta la fase cristalina sólida. Ante ese nuevo fenómeno, los físicos se plantean cuestiones del siguiente tenor: ¿cuántos átomos deben contener los microagregados para que presenten conductividad metálica? ¿Qué variaciones experimentan la estructura atómica, el punto de fusión y otras propiedades con el tamaño?

El intento de dar respuesta a esas preguntas fundamentales ha impulsado el desarrollo de técnicas experimentales para la producción de microagregados [véase "Microagregados", por Michael A. Duncan y Dennis H. Rouvray, Investigación y Ciencia, febrero de 1990]. Por otra parte, estos objetos, que pudieran parecer un tanto exóticos, revisten especial interés práctico en cuanto forman parte de aerosoles, coloides, catalizadores y otros.

Desde el punto de vista experimental, para obtener resultados significativos, los tamaños de los microagregados deben ser suficientemente pequeños y hallarse bien definidos. Dependiendo del tipo de experimento y las longitudes implicadas en el mismo, pueden requerirse tamaños de sólo 1 nanómetro (milmillonésima de metro); por longitudes entendemos aquí, por ejemplo, la longitud de onda de la radiación electromagnética que interacciona con el agregado, o bien la longitud de onda de los electrones de conducción, etcétera.

M. PILAR IÑIGUEZ y JULIO A. ALONSO trabajan en el departamento de física teórica y física atómica, molecular y nuclear de la Universidad de Valladolid de la que la primera es profesora titular y el segundo catedrático. Ambos iniciaron su investigación sobre microagregados en 1983. Alonso ha sido investigador postdoctoral en la Universidad de Pennsylvania, durante cuatro años, y ha realizado estancias de menor duración en otras universidades.

El físico comienza sus ensayos con una suspensión coloidal. Para preparar suspensiones coloidales se parte de una disolución de iones metálicos (átomos dotados de carga por pérdida, o adición, de algún electrón externo), a la que se añade un agente reductor (por ejemplo, hidrógeno atómico) cuya misión consiste en producir una disolución supersaturada de átomos metálicos en la que ocurre la condensación. Escogiendo convenientemente la concentración, temperatura y agente reductor, pueden obtenerse microagregados de dimensiones bien definidas e inferiores a los 10 nanómetros. Este método de preparación ha permitido, por ejemplo, estudiar las propiedades magnéticas de microagregados de platino de dos nanómetros, o de microagregados superconductores de mercurio.

Una forma versátil de preparar muestras de microagregados es por condensación de un vapor metálico sobre un sustrato; éste puede ser un óxido metálico, o bien un cristal de cloruro de sodio. Escogiendo convenientemente el ritmo de evaporación, el plano cristalino de la superficie del sustrato donde el vapor ha de adherirse y otros parámetros, se consiguen láminas delgadas que contienen microagregados metálicos. Una vez lograda esa reunión de átomos, se procede a estabilizarla contra la reevaporación y la coalescencia, fenómeno éste por el que los microagregados crecen a expensas de los choques mutuos. La estabilización se alcanza manteniendo el sustrato a bajas temperaturas o recubriendo la película superficial con una capa de carbón. Con tiempos de deposición de unos 100 segundos en ultra alto vacío, los microagregados de oro formados en sustratos de cloruro de sodio presentan tamaños de alrededor de 10 nanómetros.

El método de producir microagregados por evaporación del metal en una atmósfera gaseosa data de los años treinta; entonces se obtuvieron ya microagregados de oro, plata y otros metales en aire a una presión de 1 torr. (Esta unidad de presión, que indica la que soportaría un milímetro de mercurio, equivale a 133,322 newton por metro cuadrado.) El aspecto brillante usual, metálico, se pierde en estas condiciones; los microagregados presentan, pues, un aspecto muy oscuro. Débese ese fenómeno a la absorción resonante de radiación en el rango visible del espectro, para el cual las longitudes de onda son mayores que los diámetros de los microagregados. Por dicha razón, las superficies cubiertas con este tipo de microagregados pueden emplearse como absorbentes efectivos en las aplicaciones de conversión fototérmica de la energía solar; por ejemplo, en los paneles.

Para comprender el proceso de la formación de microagregados en el gas, pensemos que los átomos que escapan de la fuente de evaporación pierden energía cinética a través de las colisiones que sufren con los átomos del gas ambiente. En un vacío convencional de 10^{-5} torr, los átomos del vapor metálico tendrían un recorrido libre medio tan grande, que

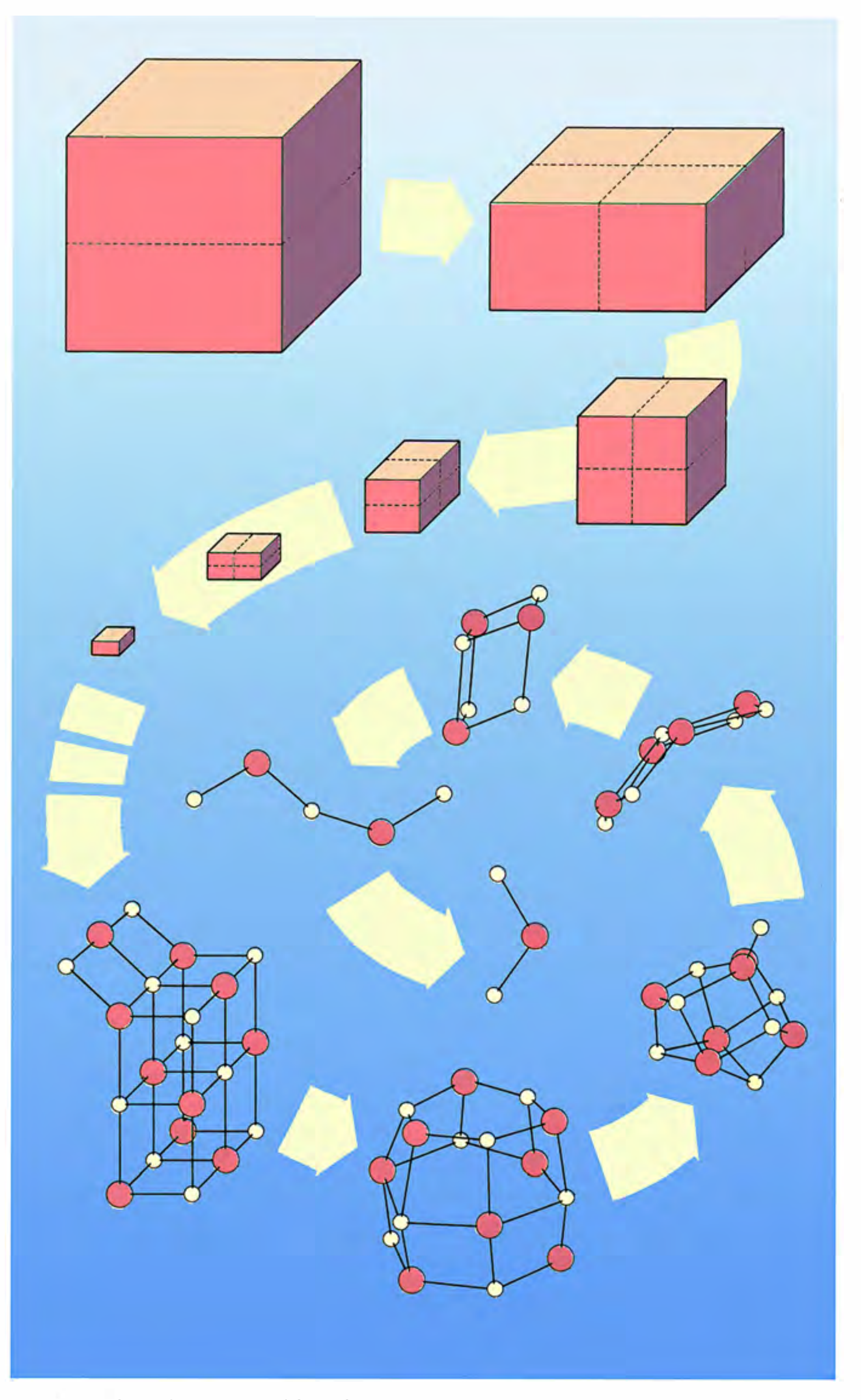
podrían alcanzar un sustrato sito a 10 centímetros de distancia sin apenas haber sufrido colisiones. Ahora bien, a una presión del gas de 1 torr, el recorrido libre medio disminuye hasta 50.000 nanómetros. Debido al buen contacto térmico entre el gas ambiente y las paredes circundantes más frías, se origina un gradiente térmico muy cerca de la fuente de evaporación. Si este gradiente adquiere intensidad suficiente, se crea una región donde la densidad del vapor metálico es superior a la densidad de saturación y se produce allí la nucleación de microagregados.

La nucleación constituye la fase inicial del proceso de crecimiento, en la cual los microagregados crecen remontando una barrera energética hasta formar núcleos de un tamaño crítico, a partir del cual es fácil continuar creciendo. Estos microagregados van creciendo posteriormente por adición de nuevos átomos del vapor y por colisiones entre ellos.

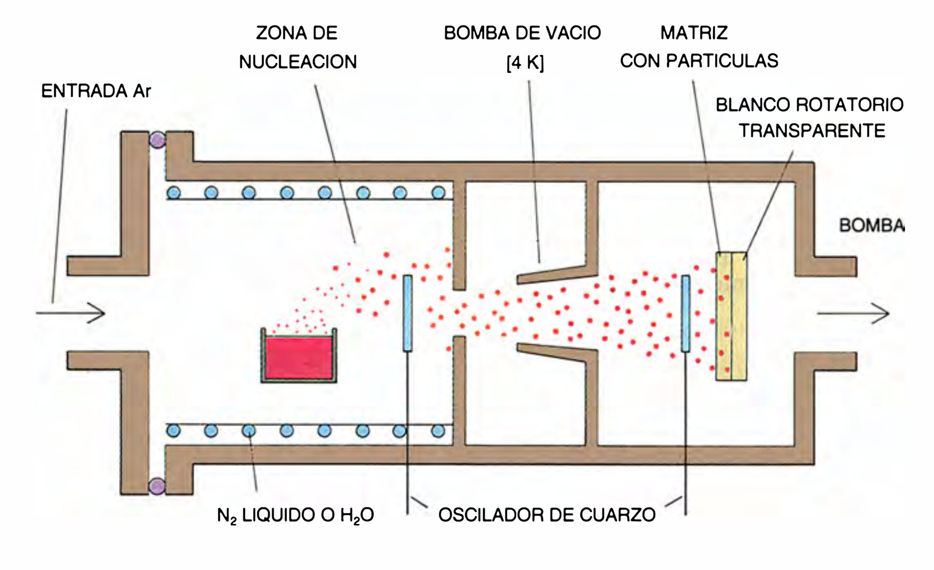
La irradiación del fluoruro de litio con neutrones ocasiona defectos en la red cristalina, amén de átomos de litio intersticiales, es decir, alojados en sitios distintos de los nudos de la red. Los átomos de litio tienden a coagularse cuando la dosis es superior a 3×10^{21} neutrones por metro cuadrado.

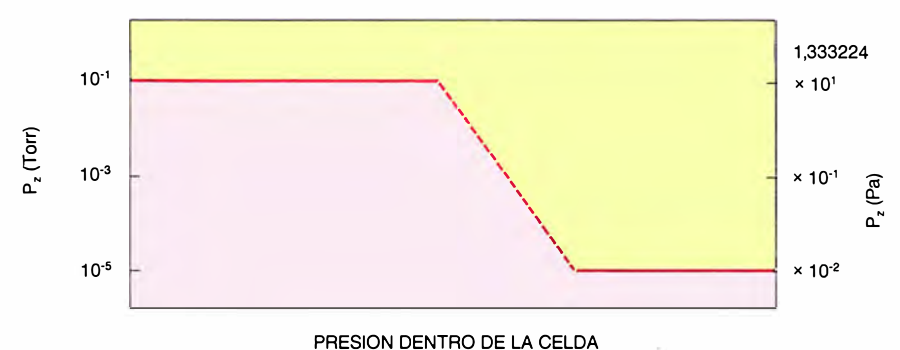
Se han realizado muchos experimentos en vidrios porosos que contienen metales en sus poros. Los vidrios porosos suelen contener un 96 por ciento de dióxido de silicio, un tres por ciento de trióxido de boro y pequeñas cantidades de óxido de sodio, trióxido de aluminio y otros óxidos. El diámetro de los poros se cifra en unos 30 nanómetros. Cuando el vidrio agujereado se sumerge en un baño de metal fundido a la presión de 7000 torr, el metal se ve forzado a penetrar en el interior de los poros. Hay muchos cristales inorgánicos que contienen cavidades regulares, las cuales forman redes o canales paralelos. Las cavidades de las zeolitas tienen tamaños entre 0,2 y 1,2 nanómetros, de manera que en alguna de ellas pueden acomodarse microagregados de sólo unos cuantos átomos. Este tipo de materiales se utiliza como catalizadores. Así, el catalizador comercial de Fischer-Tropsch está compuesto de microagregados de metales de transición (el hierro, por ejemplo), atrapados en los poros de minerales de sílice o zeolitas. En la última década, debido a la crisis energética, este catalizador ha despertado mucho interés por emplearse para la obtención de hidrocarburos a partir de monóxido de carbono e hidrógeno molecular. Como es bien conocido, las superficies metálicas son químicamente muy reactivas y se han venido empleando como catalizadores industriales. Si el metal se pulveriza, se incrementa la superficie expuesta por unidad de masa de metal, esto es, aumenta su grado de dispersión, consiguiéndose de ese modo un mejor aprovechamiento de sus propiedades catalíticas. Para tener una dispersión superior al 50 por ciento necesitamos dividir el metal hasta tamaños inferiores a los dos nanómetros. Con este diámetro, un microagregado de níquel contendría 400 átomos, 300 si se trata de paladio y 200 para el caso del platino.

Se está ahora investigando la variación de la actividad y la selectivi-



1. CUANDO UN MATERIAL SOLIDO se corta en piezas cada vez más pequeñas, se llega a un punto en que el agregado atómico sólo contiene unos pocos átomos. En esa situación las propiedades del agregado difieren bastante de las que caracterizan al sólido macroscópico. En particular la disposición geométrica de los átomos en el agregado puede diferir de la que aparece en el sólido. Esta disposición atómica se reconstruye a medida que continuamos disminuyendo el tamaño del agregado.





2. VAPORIZACION DEL METAL en una atmósfera de argón dentro de una celda cuyas paredes están refrigeradas ya sea con agua o con nitrógeno líquido. La sobresaturación conseguida permite la formación de partículas, las cuales, transportadas por la corriente gaseosa, pasan a una zona donde se extrae, por bombeo, el argón. El haz se colima a través de una apertura en el eje de la bomba y se dirige, finalmente, hacia una matriz en la que los microagregados quedan entonces atrapados.

dad catalíticas en función del tamaño de los microagregados metálicos. En ese dominio importa conocer la estructura electrónica del microagregado y su estructura geométrica, puesto que esta última determina la distribución de átomos en su superficie, que son los que desempeñan el papel principal en el fenómeno de la catálisis. Para descubrir las geometrías subyacentes en los microagregados se utiliza el microscopio electrónico, con el que se obtienen microfotografías de agregados de un solo nanómetro. (El desarrollo del microscopio de efecto túnel, dotado de un mayor poder de resolución, permitirá estudiar geometrías de tamaños inferiores. La primera aplicación de esta técnica al campo de los microagregados fue realizada en 1987 por Arturo Baró y sus colaboradores en la Universidad Autónoma de Madrid.) En microscopía electrónica, los microagregados a investigar se forman sobre delgadas películas de un material soporte, constituyendo una de las dificultades del análisis de la imagen el enmascaramiento debido a defectos en el soporte cristalino o a la naturaleza amorfa o policristalina del sustrato empleado.

Algunas de las formas observadas en micrografías son similares a las que adoptan los cristales macroscópicos ordinarios. Ello no es extraño, si pensamos que, en condiciones de equilibrio, la disposición de los átomos superficiales, causante de la forma externa, viene determinada por la condición de mínima energía superficial. Así, para la estructura cristalina cúbica centrada en las caras (ccc), común para muchos metales, esta condición favorece las formas externas octaédricas. Si a un octaedro le truncamos cuatro o seis de sus vértices, lo convertimos, respectivamente, en un dodecaedro o un cuboctaedro. Estas formas octaédricas se han observado en microagregados de platino con soportes de grafito, conjunto interesante como catalizador en la producción de gas metano que se realiza al calentar el sistema a 800 °C en una atmósfera reductora, de hidrógeno molecular, siendo la fuente de carbono el propio sustrato de grafito.

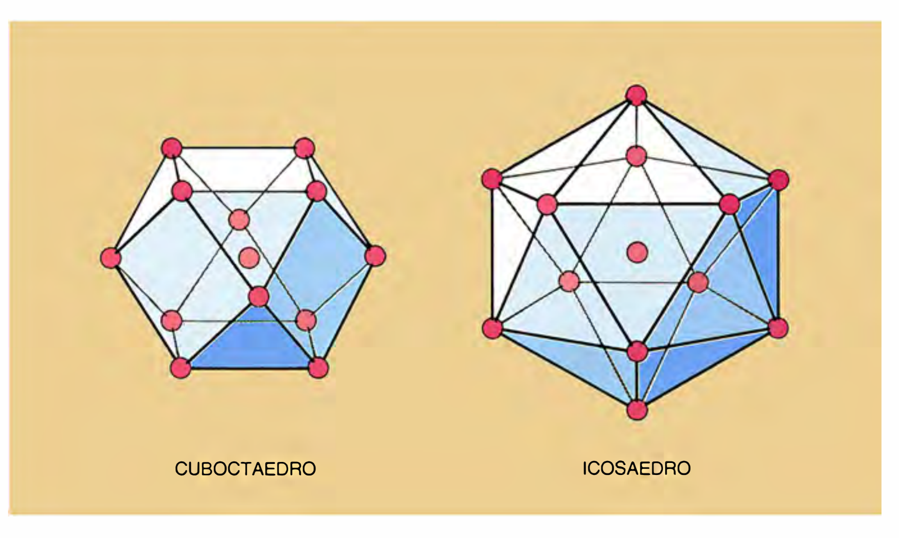
Por medio de la microscopía electrónica se puede obtener diagramas de difracción de los distintos microagregados; se descubre a veces que metales que cristalizan en cierto sistema geométrico, lo hacen en otro diferente cuando sus dimensiones son microscópicas. Algunos microagregados de oro, evaporados sobre un sustrato de cloruro de sodio, presentan también estructuras geométricas diferentes de las de los cristales macroscópicos de oro metálico (ccc). Se han observado, en particular, morfologías icosaédricas que no pueden deducirse de ninguna estructura cristalina. En las estructuras cristalinas, la periodicidad o simetría de traslación, implica que sólo son compatibles con ella ejes de simetría de órdenes 1, 2, 3, 4 o 6, mientras que el icosaedro tiene ejes de simetría de orden 5. (En cristalografía, un eje de simetría de orden n indica que una rotación de $2\pi/n$ radianes del cristal alrededor de un eje que pasa a través de un nudo de la red cristalina transforma ésta en sí misma.)

Desde un punto de vista teórico se han hecho muchos esfuerzos para predecir la estructura energéticamente más favorable de microagregados pequeños. La estabilidad de los microagregados icosaédricos por debajo del rango de los 100 o 200 átomos puede interpretarse como debida a un efecto de enlace entre los vecinos más inmediatos de un átomo.

Consideraciones geométricas simples muestran, por ejemplo, que, para 13 átomos, el poliedro con mayor coordinación (mayor número de vecinos) correspondiente a la red cúbica centrada en las caras consiste en 12 átomos superficiales más un átomo central. Una pequeña distorsión de este poliedro lo transforma en un icosaedro, aumentando el número de coordinación de los átomos superficiales de 5 a 6. Por tanto, en un modelo simple con fuerzas atractivas entre primeros vecinos, el icosaedro, con sus ejes de simetría de orden 5, puede hacer de núcleo para microagregados mayores de simetría similar. De hecho hay una secuencia de microagregados de formas icosaédricas perfectas que contienen 13, 55, 147 y más átomos, y que se observan sin dificultad en el caso de gases nobles (argón, kriptón, etcétera).

En general, las teorías vigentes sitúan en el nanómetro el tamaño aproximado por debajo del cual las ordenaciones atómicas difieren de las de la fase sólida. Hoy se recurre a una técnica de absorción de rayos X que emplea radiación de sincrotrón, especialmente eficaz para estudiar las

estructuras que forman los microagregados: se denomina EXAFS (siglas de "Extended X-Ray Absorption Fine Structure"). Con ella se obtiene el espectro que resulta de las oscilaciones en la sección eficaz del fotoelectrón debido a los procesos de dispersión que éste (arrancado del átomo por los rayos X) sufre por los átomos que rodean al átomo emisor. Esta técnica no requiere que el orden atómico sea de largo alcance, como ocurre en las técnicas de difracción, y da información sobre pequeñísimas regiones alrededor de cada átomo. Mediante el método de EXAFS han podido observarse contracciones del 2,5 por ciento, en el parámetro de la red de microagregados de oro con un nanómetro de diámetro, respecto de la fase sólida. Según las leyes termodinámicas, cabe esperar esta contracción en microagregados debido a la tensión superficial, aunque podríamos preguntarnos si también los microagregados siguen las leyes de la termodinámica macroscópica.



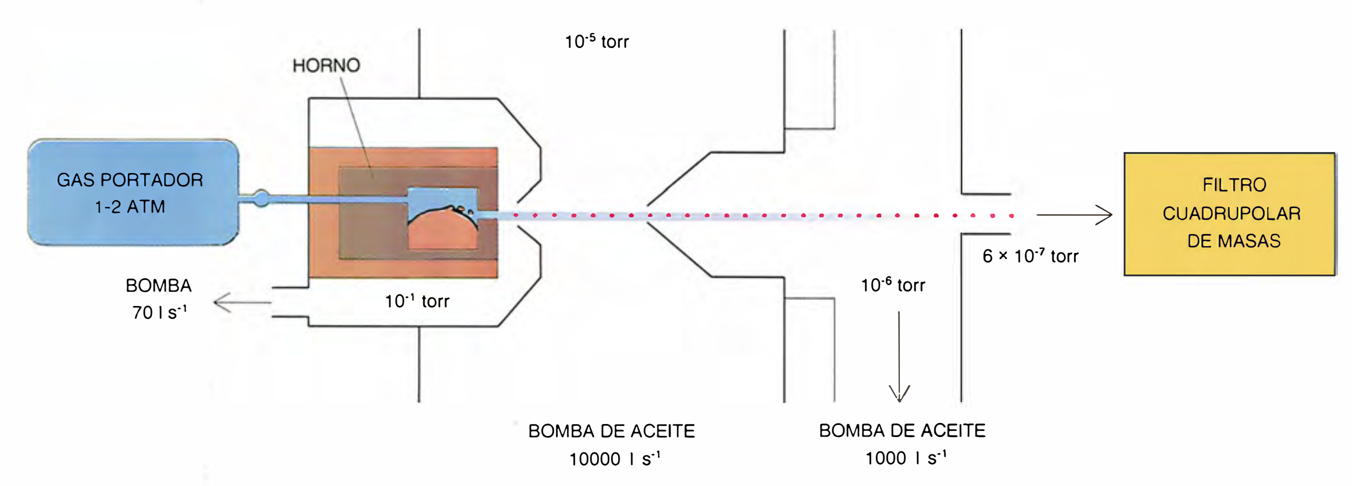
3. MICROAGREGADOS cuboctaédricos e icosaédricos con 13 átomos. corresponden a un fragmento de una estructura cúbica y a una morfología no deducible de ninguna estructura cristalina.

Consideremos ahora la estructura electrónica de los microagregados. Del familiar modelo de electrones libres resulta que, en un metal, a tenor de las reglas de la mecánica cuántica, los niveles de energía de los electrones están tan juntos que se puede hablar de una función continua que representa la distribución de los electrones en sus diferentes estados de energía, prácticamente insensible a la presencia de la superficie del metal.

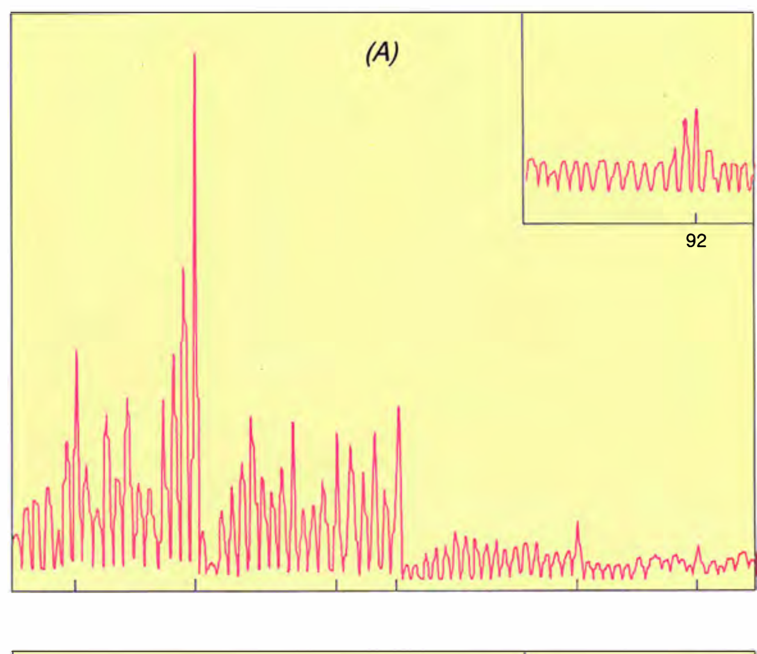
Cuando tratamos con microagregados, hemos de modificar drásticamente esta imagen simple de los electrones metálicos. La extensión finita va a provocar una discretización de los niveles de energía, que sentirán el efecto de la superficie a través de las condiciones de contorno que ha de satisfacer la función de onda del electrón. A la temperatura del cero absoluto, los niveles electrónicos están llenos hasta el denominado nivel de energía de Fermi; los superiores se encuentran desocupados. Si N es el número de electrones libres del microagregado, el intervalo δ entre sus niveles de energía será del orden dado por la razón de energía de Fermi a N. Y si consideramos que la energía de Fermi se cifra en varios electronvolt para los metales, tendremos que, para partículas de un diámetro de 5 nanómetros, el valor del intervalo será de unos 10^{-4} electronvolt.

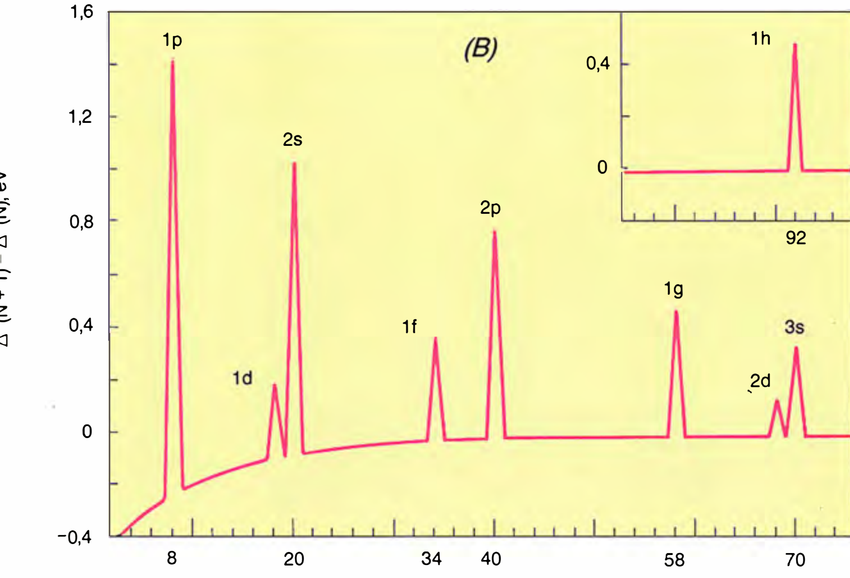
Respecto a las propiedades de metales macroscópicos, δ es menor que cualquier cantidad de energía significativa, pues ese intervalo disminuye con N. No otra cosa quiere indicar que los niveles forman un espectro casi continuo. Ahora bien, a bajas temperaturas, T, tales que δ sea comparable con la energía de agitación térmica a la temperatura T, o con débiles campos magnéticos H, tales que δ sea comparable con la magnitud del desdoblamiento de los niveles electrónicos inducido por H, tendremos que la capacidad calorífica o la susceptibilidad magnética del agregado difieren bastante de las del metal. (La energía de agitación térmica a la temperatura T es del orden de $0{,}86 \times \times 10^{-4}\ T$ electronvolt.)

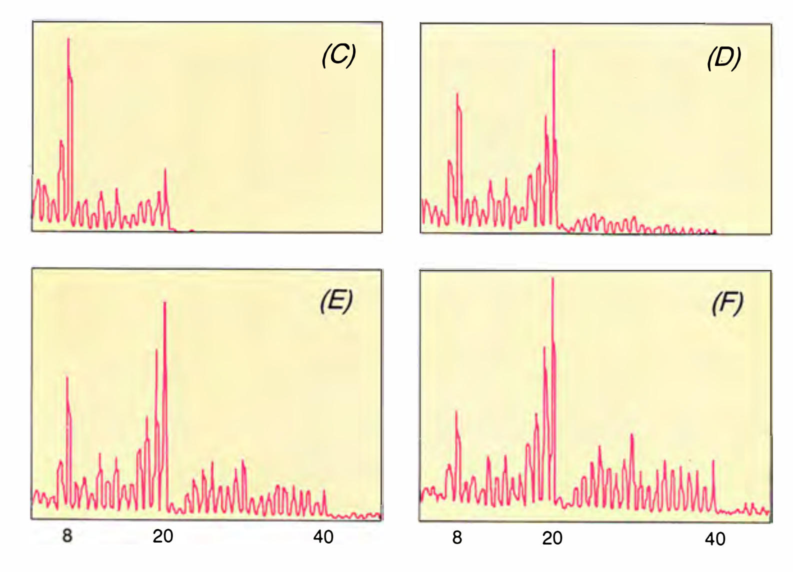
Las mediciones por resonancia magnética nuclear (RMN) han aportado pruebas de la existencia de estos efectos de cuantificación. Durante más de veinte años se ha intentado demostrar experimentalmente la cuantización de los niveles con métodos ópticos usando las frecuencias del infrarrojo lejano, que son comparables con los intervalos entre los niveles electrónicos adyacentes. Sin embargo, debido a que los microagregados de las muestras no alcanzan el mismo tamaño, en vez de ofrecer unas separaciones entre niveles bien definidas, se tiene una distribución estadís-



4. VAPOR DE SODIO METALICO, rápidamente enfriado y sobresaturado mediante una expansión adiabática que resulta en un chorro supersónico de microagregados. La presión del vapor metálico, el tamaño del orificio y la presión del gas semilla son los distintos parámetros críticos.







tica de ellas que puede llegar a enmascarar los resultados esperados. El propio soporte de los microagregados altera también sus propiedades ópticas. Ello explica que no se haya conseguido todavía demostrar, con estos métodos, la estructura de niveles.

Una nueva manera de producir microagregados libres, sin soporte de ningún material, abre interesantísimas vías a la exploración de sus propiedades fundamentales. Nos estamos refiriendo a microagregados producidos en chorros supersónicos. Desde hace tiempo se sabe que la expansión adiabática de un gas o vapor en vacío enfría rápidamente el gas y puede resultar en un vapor sobresaturado. Si el gas contiene átomos extraños, no tardará en desarrollarse la condensación en tales núcleos y en formarse una dispersión de pequeñas gotas o microcristales del gas en expansión. Ahora bien, en el proceso de nucleación homogénea, que es el que importa aquí, los núcleos que se originan son microagregados de los mismos constituyentes del gas, y así se produce la condensación en gases puros que se encuentran suficientemente sobresaturados.

Los fenómenos de nucleación-condensación han constituido un permanente contratiempo para los ingenieros y operadores de turbinas de vapor, y una bendición para fabricantes de materiales finamente dispersados. En la escala de la atmósfera terrestre dan cuenta de la lluvia, nieve, granizo y niebla. En el marco del universo, la nucleación-condensación fue responsable de la formación de la materia condensada en sus diferentes configuraciones y tamaños. Hasta hace una treintena de años, la escala temporal de la mayoría de las expansiones gaseosas adiabáticas era muy grande en comparación con la escala temporal de la cinética molecular del proceso de nucleación-condensación. Y, así, las etapas más tempranas observables del proceso eran ya tardías,

5. ESPECTRO DE MASAS de microagregados de sodio de hasta 75 átomos (*a*). La intensidad en el fondo de la escala de la figura principal es de 20.000 cuentas por segundo. La figura intercalada corresponde al rango 74-100 átomos. La presión de vapor de sodio es de 182 torr y se utilizó como gas semilla argón a una presión de 5700 torr. La cantidad E(N+1) − 2E(N) + E(N-1), siendo E(N) la energía de la partícula con N átomos obtenida en un cálculo teórico, mide la estabilidad relativa de la partícula de N átomos con respecto a las adyacentes (*b*). Picos en esa magnitud corresponden a microagregados especialmente estables. Los picos de la figura pertenecen a microagregados con las capas electrónicas llenas. Al variar la presión del argón [(*c*) 2280 torr, (*d*) 3040 torr, (*e*) 3800 torr y (*f*) 4560 torr], los números mágicos no varían.

pues la nueva fase había crecido hasta tamaños macroscópicos.

En 1956, Erwin Becker y Wolfgang Henkes, de la Universidad de Marburg, se dieron cuenta de que la condensación era un fenómeno con el que había que contar en haces supersónicos que se expandieran al vacío a través de pequeñísimos orificios. Se puede decir que estos investigadores realizaron el primer experimento sobre formación de microagregados. En 1961 se inició una nueva era en la investigación de microagregados cuando el mismo Henkes daba a conocer la detección, por medio de espectrometría de masas, de dímeros moleculares en haces libres de dióxido de carbono. Todavía en 1977, algunos científicos mantenían que los microagregados aislados en vacío eran un delirio teórico. Pero en los últimos años muchos grupos de investigación han trabajado activamente y hoy pueden producirse, y analizarse, microagregados cuyos tamaños van desde el dímero hasta miles de moléculas.

Para producir chorros supersónicos metálicos, se comienza por vaporizar el metal en un horno a alta temperatura o mediante láseres pulsantes de alta potencia. En este último caso se obtiene, en vez de un chorro continuo, un chorro pulsante. A los vapores metálicos se les obliga a pasar por un pequeño orificio, de unos 50.000 nanómetros, en el que por choques se producen los microagregados. A la salida se expanden en alto vacío para formar el chorro supersónico. Habida cuenta de la parvedad de las dimensiones de tales chorros, la escala temporal de la expansión es del mismo orden que la escala temporal del proceso de nucleación-condensación. El resultado neto es que las primeras etapas de esos procesos pueden resolverse y analizarse.

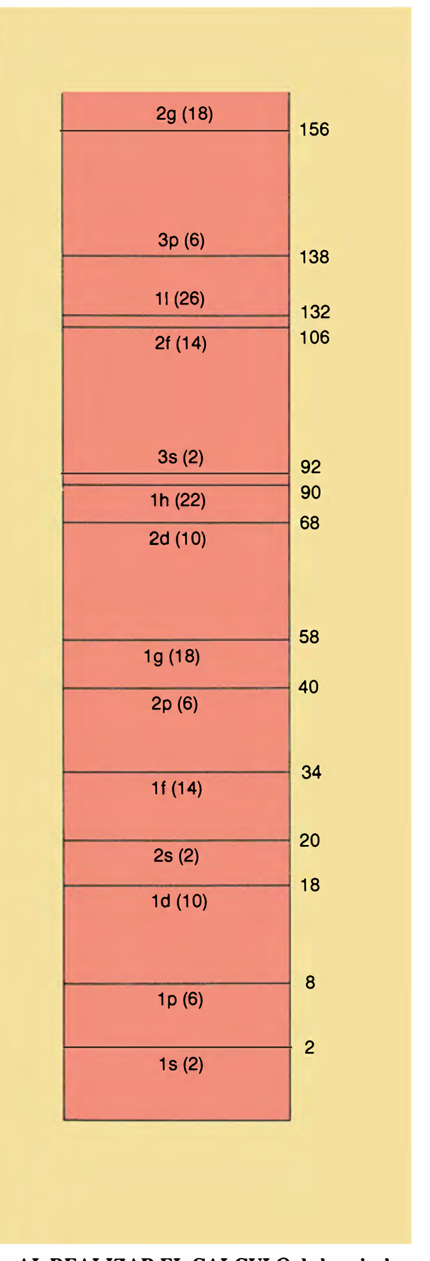
Si el vapor metálico se expande conjuntamente con un gas noble, los microagregados crecen con mayor facilidad, obteniéndose tamaños superiores. Para identificar los microagregados se recurre al espectrómetro de masas; a la detección en el espectrómetro precede la ionización de los microagregados del haz mediante bombardeo con electrones de determinada energía o por absorción de radiación electromagnética.

En el espectrómetro de tiempo de vuelo, el haz de microagregados ionizados curva su trayectoria al paso entre dos placas metálicas, entre las que se aplican pulsos de voltaje, de una millonésima de segundo de duración a intervalos de milisegundos. El haz avanza entre uno y dos metros hasta llegar al detector, que traduce el impacto de cada microagregado ionizado en un pulso eléctrico que debe amplificarse. El intervalo temporal que media entre el pulso de voltaje en las placas y el pulso entregado por el detector mide el tiempo de vuelo de cada ion, tiempo que guarda relación con su masa, con la longitud recorrida, con el potencial de aceleración y con la carga del ion considerado. Un analizador multicanal registra en su memoria el número de pulsos registrados durante determinado intervalo para valores diferentes de tiempo de vuelo, o, lo que es equivalente, de la masa de los microagregados.

Así se obtiene el espectro de masas de los microagregados ionizados. El espectro está formado por picos cuya altura es proporcional al número de microagregados de masa m detectados durante cierto intervalo temporal. Hay microagregados de determinados tamaños que se destacan por su particular abundancia, o, dicho de una manera más precisa, la tasa de contaje muestra un bajón brusco después de esos tamaños, lo cual significa que, para cierto número de átomos, los microagregados son más estables que para otros. Esos microagregados de estabilidad privilegiada poseen "números mágicos" de átomos, así llamados por su analogía con los números mágicos de los núcleos atómicos. En microagregados de sodio, así como de otros elementos alcalinos, estos números mágicos son 2, 8, 20, 40, 58 y 92, y pueden ser interpretados mediante una sencilla teoría electrónica. Pensemos, por ejemplo, que cada átomo de sodio posee un electrón de valencia, es decir, un electrón que va a participar en el enlace metálico. En consecuencia, los microagregados con número mágico de átomos poseerán 2, 8, 20, 40, 58 y 92 electrones.

¿Dónde tienen su origen? Con cierta ingenuidad podemos imaginar que el microagregado es esférico, con sus electrones de valencia atrapados en un pozo de potencial dotado de simetría esférica. Entonces, los niveles de energía de los electrones vienen caracterizados por el número cuántico l asociado al momento angular orbital. Para cada valor de l, el momento angular puede tener $2l + 1$ orientaciones diferentes, siendo la energía del electrón igual para todas ellas, debido a la simetría esférica del pozo. Por otra parte, el espín del electrón puede tener dos orientaciones distintas (arriba y abajo). En consecuencia, resultan $2(2l + 1)$ estados cuánticos con idéntica energía para cada valor de l.

Para que la energía del estado quede completamente caracterizada, tenemos que conocer, aparte del valor de l, otro número cuántico, n, que se denomina número cuántico principal y tal que n-1 sea el número de nodos de la función de onda del electrón. (Los nodos son los valores de la dis-



6. AL REALIZAR EL CALCULO de los niveles energéticos de electrones atrapados en un potencial de simetría esférica con forma de pozo cuadrado y paredes infinitamente altas, obtenemos la ordenación ilustrada. El primer número, o número cuántico principal, indica el número de veces que la función de onda electrónica se anula más uno. La letra designa el momento angular orbital l: $s(l=0)$, $p(l=1)$, $d(l=2)$, $f(l=3)$, $g(l=4)$, $h(l=5)$, $i(l=6)$, etcétera. El que aparece entre paréntesis es el número de electrones que caben en cada nivel; el número a la derecha corresponde al número total de electrones que llenan todos los niveles inferiores hasta el nivel indicado inclusive. Microagregados muy estables corresponden a capas electrónicas llenas. El empezar a llenar una nueva capa implica un aumento brusco de la energía electrónica y menor estabilidad.

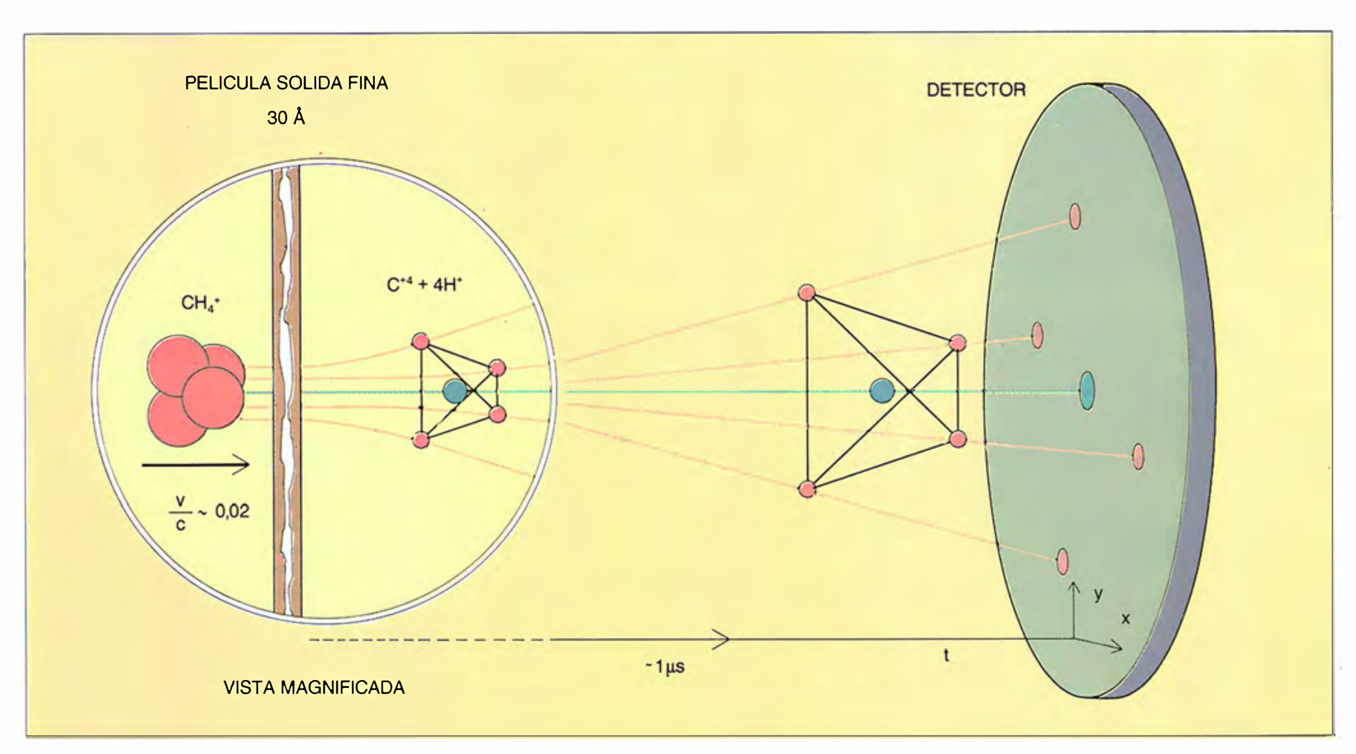
tancia al centro del pozo en los que la función de onda cambia de positiva a negativa o viceversa.) Ordenando los niveles cuánticos según sus energías, esto es, de electrones más ligados a electrones menos ligados, puede verse que, en el nivel más bajo ($n=1$, $l=0$), caben dos electrones, seis en el siguiente ($n=1$, $l=1$), diez en el siguiente ($n=1$, $l=2$), y así sucesivamente. La consiguiente ocupación de capas electrónicas se ajusta a los números mágicos observados en microagregados de sodio y de otros elementos alcalinos por Walter Knight y colaboradores, de la Universidad de California en Berkeley. La pérdida de estabilidad que se observa, en el ejemplo del sodio, inmediatamente después de cada número mágico se debe al salto en la energía para empezar a ocupar la capa electrónica inmediata superior.

Los elementos alcalinos como sodio o potasio tienen una estructura electrónica muy sencilla y en el estado metálico se adaptan perfectamente al modelo de electrones libres. Más curioso resulta el que científicos de la Universidad de Osaka hayan observado los mismos números mágicos en microagregados de los metales nobles cobre, plata y oro. Estos tienen también un electrón externo que participa en el enlace, pero el corazón iónico no es tan inerte como en los elementos alcalinos; de hecho, los electrones de tipo *d* del corazón iónico contribuyen al enlace en los metales nobles. Es, por tanto, notable que pequeños agregados de cobre, plata y oro se comporten como alcalinos y que los electrones *d* del corazón iónico no ejerzan ninguna influencia en las variaciones de la población de agregados.

Ideas similares, basadas en un modelo de capas, se han usado para explicar los números mágicos observados en aluminio, cinc y cadmio. Evidentemente, en estos casos el número de electrones de valencia con que cada átomo contribuye es más de uno; con ello, para obtener los números mágicos de electrones 8, 20, 34, 40, 58 y 92 citados anteriormente, basta, en el caso de átomos divalentes, con la mitad de átomos: 4, 10, 17, 20, 29 y 46. La naturaleza electrónica de estos números mágicos es algo sorprendente. ¿Es que no se manifiesta la estructura geométrica del microagregado? En nuestro grupo se ha trabajado bastante para aclarar esta cuestión. Como posible explicación hemos sugerido que la temperatura de los microagregados formados en expansiones supersónicas es alta y sus átomos se hallan en movimiento, no disponiéndose en estructuras geométricas bien definidas. La difícil determinación de la temperatura interna del agregado impide ofrecer todavía una respuesta concluyente a estas preguntas, aunque experimentos realizados por Ernest Schumacher en la Universidad de Berna apoyan nuestra interpretación. Para ser más claros, los números mágicos de microagregados "fríos" no coinciden del todo con los de microagregados "calientes". En cualquier caso, sí que se puede decir que los espectros de masas de partículas "calientes" de metales sencillos reflejan la naturaleza discreta de los niveles electrónicos, tan buscada años atrás.

Para otros metales, como el bario, se encuentran números mágicos sin nada que ver con el número de electrones; obedecen, por contra, a motivos geométricos. En su espectro de masas hay picos intensos correspondientes a la secuencia de números mágicos 13, 19, 23, 26, 29 y 32. Estos números se explican del siguiente modo. El microagregado de 13 átomos es un icosaedro con un átomo en el centro. Hagamos ahora crecer el microagregado añadiendo un átomo encima de cada una de las cinco caras que rodean a uno de los vértices del icosaedro y, por último, otro átomo encima del propio vértice. El icosaedro con esta capucha tiene 19 átomos; la formación de la capucha maximiza el número de enlaces. La formación posterior de capuchas adyacentes a la primera da lugar a la secuencia de números mágicos escrita arriba.

El interés de estos resultados yace en que dan información sobre el tipo de enlace químico entre los átomos del microagregado. El átomo de bario



7. VISTA ESQUEMATICA de un experimento de explosión coulombiana. Cuando una molécula acelerada (o un pequeño microagregado) pasa a través de una película sólida delgada, la molécula pierde sus electrones externos. Los iones positivos se repelen mutuamente, transformándose la microestructura en una macroestructura que puede medirse de forma precisa mediante un detector apropiado. Con esta nueva técnica se ha empezado a obtener información directa sobre la estructura geométrica de moléculas y pequeños agregados atómicos. (Ilustración de Pere-Anton Rovira.)

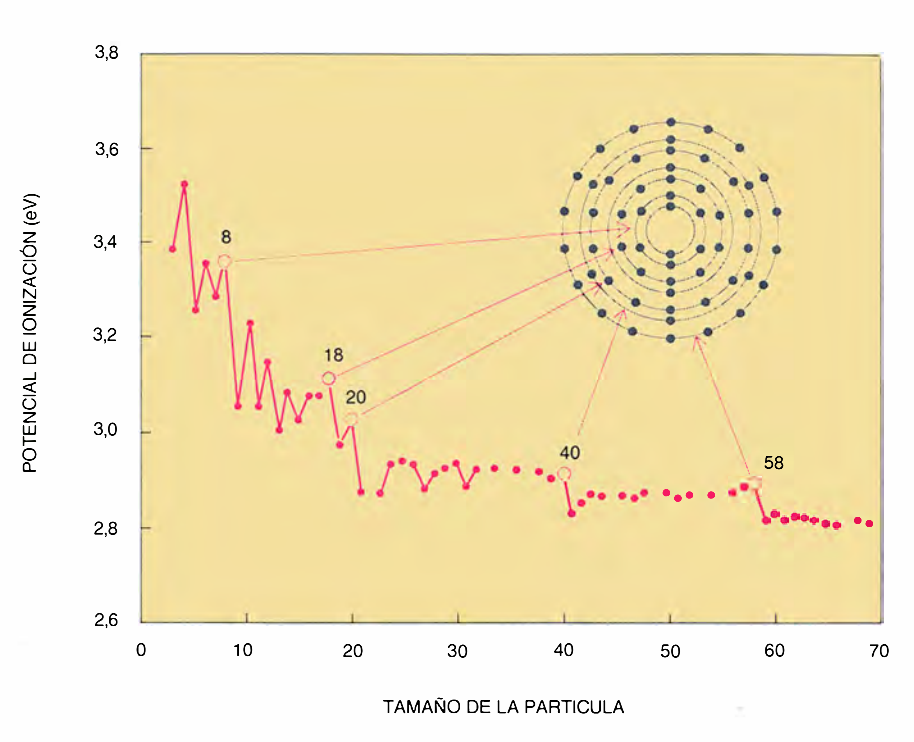
presenta una estructura electrónica de capas completas. Por otro lado, la secuencia de números mágicos del bario coincide con la observada en los mejores aislantes, que son los gases nobles: argón, kriptón, etcétera. Pequeños agregados de bario parecen ser, por tanto, aislantes, aunque, a medida que el tamaño del microagregado aumenta, en algún momento se producirá la transición al estado metálico. Los números mágicos de partículas de antimonio son múltiplos de cuatro y se explican mediante estructuras formadas por tetraedros. Las estabilidades de partículas de silicio y germanio también se relacionan con estructuras geométricas.

Hemos visto que en los espectros de masas se detectan microagregados ionizados. Cabe preguntarse, pues, si el proceso de ionización alterará la distribución de tamaños de los microagregados neutros. Este es un campo de activa investigación. Por una parte, el propio proceso de ionización puede fragmentar el microagregado en dos más pequeños. Por otra, cuando un microagregado se ioniza, queda en él un exceso de energía electrostática, cuya cuantía depende, directamente, del número de electrones arrancados en el proceso de ionización e, inversamente, del tamaño del microagregado.

El fenómeno de la explosión coulombiana consiste en la ruptura del microagregado en fragmentos debido a que la repulsión electrostática entre los defectos de carga (o cargas positivas efectivas) creados por la ionización es tal que no puede contrarrestarse por las fuerzas de enlace entre los átomos del microagregado. Cuanto mayor es la energía del electrón ionizante, mayor es el grado de ionización de los microagregados.

En algunos casos el grado de ionización no parece interferir con los números mágicos de abundancia. Por ejemplo, se ha observado en microagregados de bario doble y triplemente ionizados la misma secuencia de números mágicos comentada antes para microagregados de bario neutros. Eso sí, no se han observado microagregados doblemente cargados (Ba_N^{++}) de menos de 22 átomos, hecho que se debe, evidentemente, al fenómeno de la explosión coulombiana. En otros casos, más complicados de explicar, los números mágicos de microagregados neutros y cargados difieren a veces en algunos detalles. Esto ocurre, por ejemplo, con el plomo.

El proceso de la explosión coulombiana también se está empezando a usar para investigar la geometría de microagregados muy pequeños. El fundamento físico es el siguiente: si conseguimos "desnudar" a los átomos de un pequeño agregado de sus electrones externos, el esqueleto iónico resultante explotará en virtud de la repulsión coulombiana entre los iones. Como las fuerzas coulombianas dependen sólo de distancias entre las cargas que se repelen y de la magnitud de éstas, los fragmentos que se detectan dibujarán una imagen tridimensional ampliada de la geometría original del microagregado.



8. EL POTENCIAL DE IONIZACION de microagregados de sodio decrece con el tamaño de los mismos. Se observa además una estructura en dientes de sierra (efecto par-impar) para tamaños inferiores a 20 y unas caídas bruscas para tamaños de 8, 18, 20, 40 y 58 átomos. Estas últimas tienen su origen en el hecho de que los microagregados correspondientes poseen capas electrónicas llenas.

En chorros supersónicos se pueden medir potenciales de ionización de los microagregados, es decir, la mínima energía necesaria para arrancarles un electrón. Se emplean haces de fotones de energía variable para ionizarlos y establecer la mínima energía del fotón para la cual comienzan a registrarse impulsos en el canal del conjunto detector-analizador correspondiente a cada tamaño. El potencial de ionización de microagregados de sodio entre 1 y 65 átomos disminuye al aumentar el tamaño, en forma similar al trabajo necesario para arrancar un electrón de una esfera conductora. Superpuesto a este comportamiento hay, no obstante, oscilaciones y saltos bruscos que reflejan la estructura de capas que adoptan los electrones en estos microagregados. En microagregados de hierro de 1 a 25 átomos, el potencial de ionización disminuye bruscamente con el tamaño, disminución que se acompaña de oscilaciones mucho más fuertes que en el sodio. Las propiedades catalíticas de los microagregados dependen del potencial de ionización, que es una medida de su reactividad.

Otra consecuencia de la naturaleza discreta de los niveles electrónicos en los microagregados es el efecto par-impar, según el cual los microagregados con un número par de electrones se muestran más estables que los dotados de un número impar y suelen tener un potencial de ionización algo mayor. Ello se debe a que el espín del electrón puede presentar dos orientaciones diferentes, de manera que, si el número de electrones es par, existe el mismo número de electrones con cada orientación de espín. Pero queda mucho camino por andar si se compara con los dos límites entre los que se sitúan los microagregados: los átomos por un lado y la materia condensada por otro.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ELEMENTAL AND MOLECULAR CLUSTERS. Springer Series en *Materials Science*, vol. 6. Dirigido por G. Benedek, T. P. Martin y G. Pacchioni. Springer; Berlín, 1988.

PROCEEDINGS OF THE IV INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SMALL PARTICLES AND INORGANIC CLUSTERS. *Zeitschrift für Physik D: Atoms, Molecules and Clusters*, vol. 10, n.os 2 y 3; 1989.

Oliver Heaviside

Eminente físico victoriano que desdeñó el rigor matemático, hombre tímido que puso a sus enemigos en la picota, Oliver Heaviside sentó las bases del diseño moderno del circuito eléctrico

Paul J. Nahim

Nació en un suburbio londinense, carecía de educación universitaria y fue un desempleado, si exceptuamos los seis años que estuvo ocupado como oficinista de telégrafos. Sin embargo, gracias a su talento y tesón, Oliver Heaviside se convirtió en un físico victoriano sobresaliente. Aclaró y amplió la teoría electromagnética de James Clerck Maxwell, descubrió el principio que hacía posible la telefonía a larga distancia y previó la televisión, la radio y algunos aspectos de la teoría de la relatividad de Einstein.

A pesar de que Heaviside fue muy estimado por los científicos de su tiempo, ha caído en un olvido casi absoluto, en parte porque sus métodos tuvieron tanto éxito que pasaron a los libros de texto para describir el trabajo de investigadores que le precedieron. Hoy, por ejemplo, muchos científicos admiten sin más que el uso de vectores para describir fuerzas era algo que ya estaba al alcance de Newton dos siglos antes. La verdad es que fue Heaviside quién instauró su aplicación en física.

Resulta extraño que la sensibilidad moderna, tan atenta a las personalidades pintorescas, pueda rechazar la de un británico cuya individualidad sobresale incluso en una época plagada de figuras de todos los colores: el general Charles Gordon de Khartoum, Florence Nightingale, Lewis Carrol y Jack el destripador. Oliver Heaviside fue un excéntrico entre excéntricos, un hombre hecho a sí mismo en un siglo hecho a sí mismo.

En resumen, Heaviside podía haber sido un personaje sacado directamente del mundo de Dickens. Nació en 1850, no muy lejos de una fábrica de calzado en la que el novelista había trabajado de niño, y era el menor de cuatro hijos de un grabador enfermizo que apenas podía sostener a su familia. Un temprano ataque de escarlatina dejó su oído dañado para siempre, lo que le apartó de la relación con otros niños. Esta barrera configuró una personalidad dispuesta a la confrontación y un estilo sarcástico que, en ocasiones, le llevaría demasiado lejos en sus ataques hacia todos aquellos que disentían de sus opiniones. Años después recordaría su juventud con gran amargura, declarando que había deformado para siempre el curso de su vida.

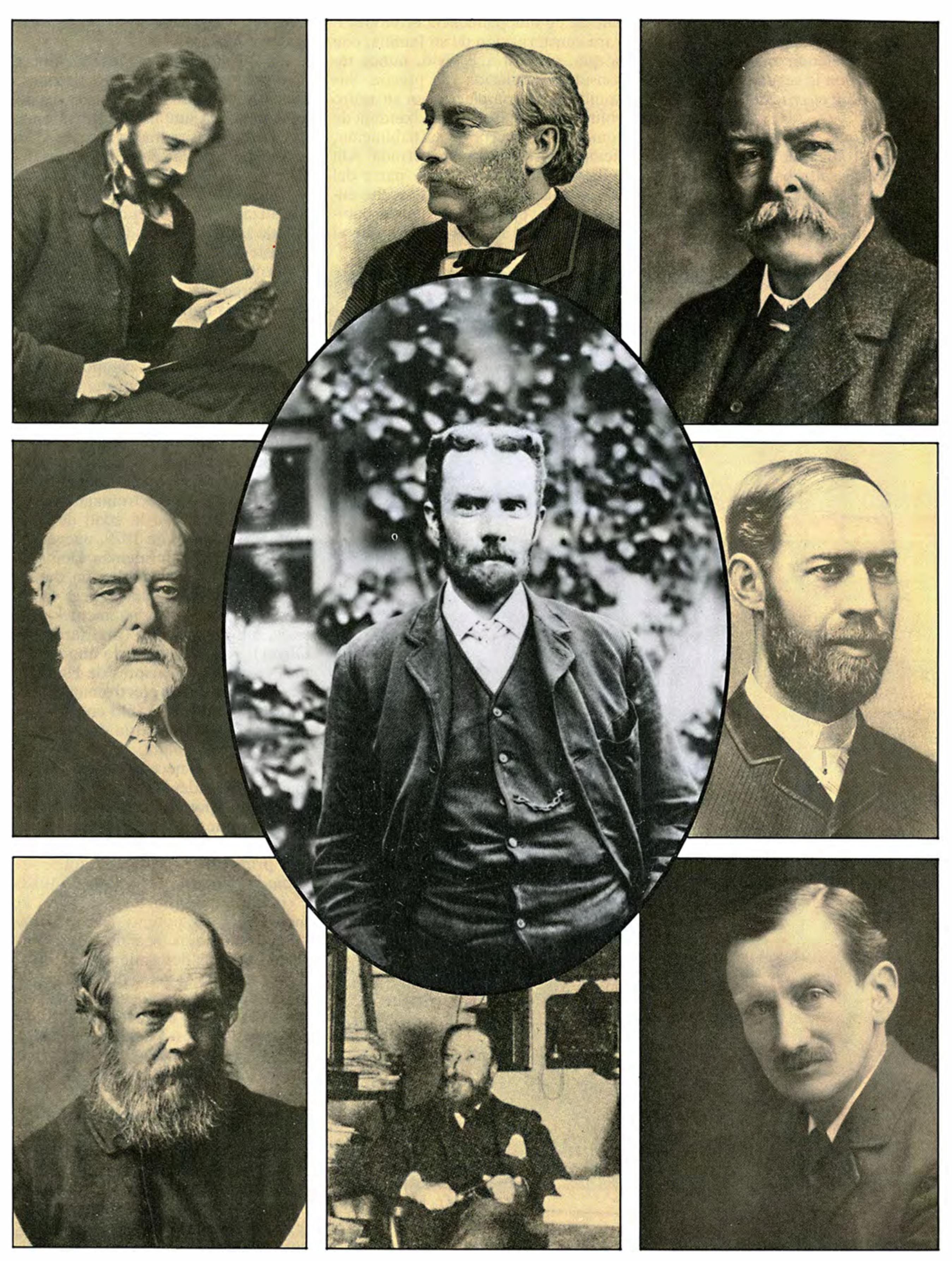
Heaviside, sin embargo, obtuvo muy buenos resultados en la escuela. Acabó quinto entre más de quinientos candidatos que se presentaron al examen para la Escuela de Magisterio, que tuvo lugar en 1865. Un desastroso 15 por ciento sobre la puntuación global en el examen de geometría euclídea fue la peor nota del futuro físico-matemático, una curiosa debilidad que presagiaba su futura impaciencia a la hora de enfrentarse con pruebas rigurosas. "Euclides es lo peor", escribiría más tarde. "Es chocante que la gente joven tuviera que estar estrujándose el cerebro por sutilezas lógicas, tratando de entender la prueba de un hecho obvio en términos de algo igualmente obvio, alimentando así una profunda aversión por las matemáticas, cuando debieran estar aprendiendo geometría, una materia fundamental".

En cualquier caso, el joven Heaviside, sin recursos ni deseos para ulteriores estudios académicos, abandonó la escuela a los dieciséis años, aprendió por sí mismo el código Morse y las bases de la electricidad, y marchó, con dieciocho años, a trabajar para una compañía de telégrafos en Dinamarca. Sería el único puesto retribuido de su vida.

Obtuvo el puesto gracias a su tío, Sir Charles Wheatstone, esposo de la hermana de su madre. A Wheatstone, un industrial afortunado que contaba con William Thomson (posteriormente Lord Kelvin) y Michael Faraday entre algunos de sus muchos amigos científicos, se le recuerda en relación con el "puente de Wheatstone", instrumento para medir la resistencia eléctrica (aunque él no intervino en su invención). Debió ser fácil para un hombre así asegurar trabajo a su sobrino, quien ante el requerimiento de su tío se había preparado añadiendo el danés y el alemán al conocimiento de otras lenguas que dominaba. Para Heaviside, el cambio se limitaba a proseguir el camino abierto ya por su hermano mayor Arthur, que fue un empleado de la Compañía Privada Universal de Telégrafos hasta que todas las operaciones nacionales del telégrafo quedaron sometidas al monopolio de la Oficina de Correos Británica (GPO), en 1870.

Heaviside adquirió experiencia práctica como telegrafista y reparador de averías técnicas, lo que le valió ascender con rapidez. Volvió a Inglaterra y, en 1871, se convirtió en el jefe de operadores de la oficina que tenía la Gran Compañía de Telégrafos del Norte en Newcastle upon Tyne, que se ocupaba de controlar el tráfico marítimo. Mientras tanto, se había sumergido en un ambicioso programa autodidacta en ciencias y matemáticas. Su progreso queda patente en sus dos primeros escritos sobre electricidad, publicados en 1872 y 1873. En el primero, sólo utilizó el álgebra, pero

PAUL J. NAHIM, profesor de ingeniería eléctrica en la Universidad de New Hampsire en Durham, es el autor de *Oliver Heaviside*: *Sage in Solitude*. Realizó sus estudios en la Universidad de Stanford y en el Instituto de Tecnología de California. Después trabajó ocho años en la industria aeroespacial, antes de proseguir su formación en la Universidad de California en Irvine, donde obtuvo el doctorado en ingeniería eléctrica, en 1972.



1. AMIGOS Y ENEMIGOS que Heaviside se granjeó gracias a su brillante intelecto y a su lengua acerada rodean a nuestro hombre en este montaje fotográfico. Los amigos son (*en el sentido de las agujas de reloj, desde el centro izquierda*) Sir Oliver Joseph Lodge, Lord Kelvin, Lord Rayleigh, John Henry Poynting y Heinrich Hertz. Los enemigos (*abajo, de izquierda a derecha*) son Peter Guthrie Tait, William Henry Preece y William Burnside.

en el segundo empleaba el cálculo para analizar el "puente de Wheatstone", mereciendo que Maxwell lo mencionara en la segunda edición del *Tratado sobre electricidad y magnetismo*.

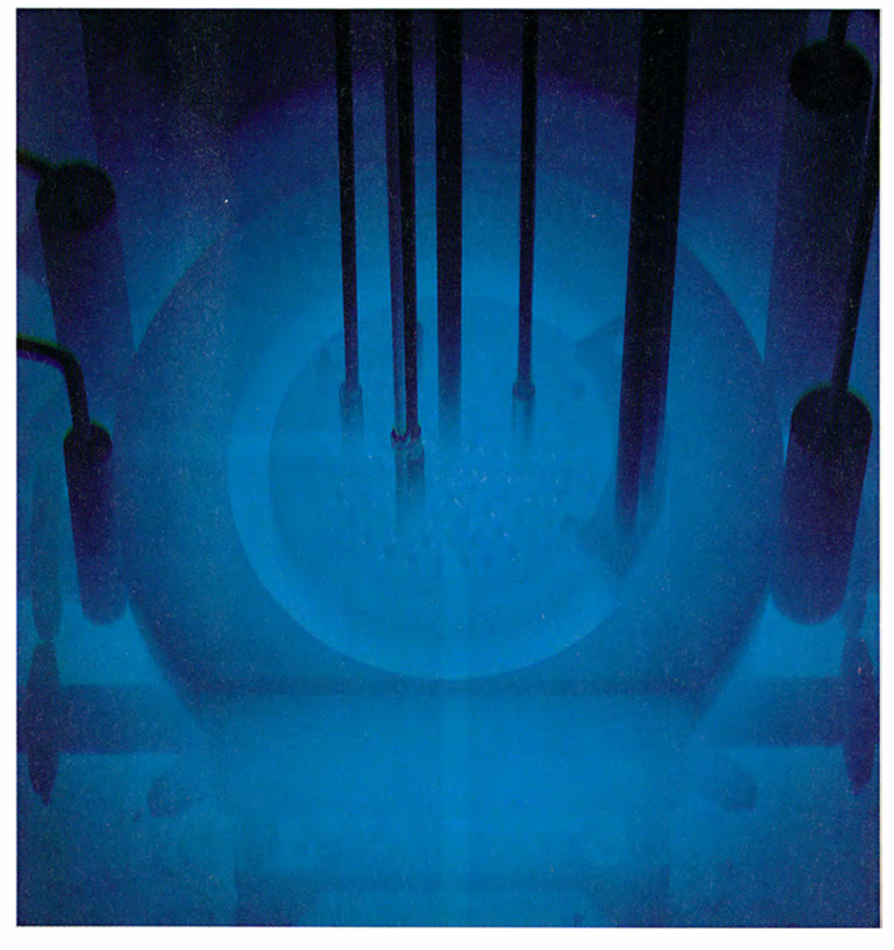
Parece que su encuentro con el magnífico tratado de Maxwell le llevó a abandonar su trabajo en 1874, para dedicarse por entero al estudio. Era una decisión crítica para un hombre que contaba con veinticuatro años y carecía de independencia económica. Para consternación de su familia, con la que, y de la que vivió, nunca reconsideró jubilación tan precoz. Sus familiares le complacían en su retiro voluntario, dejándole una bandeja de comida a la puerta de su habitación, siempre herméticamente cerrada. Allí trabajaba toda la noche y parte del día, a la luz de lámparas de aceite ennegrecidas, que hacían que la habitación estuviera "más caliente que el infierno", según palabras de alguien que le conoció.

Lo mismo que el joven Albert Einstein veinticinco años después, Heaviside fue ganado para la causa de la física por la simplicidad subyacente que consiguió ver tras la complejidad matemática de la teoría de Maxwell. Este había demostrado la unidad de la electricidad y el magnetismo matematizando la concepción de Faraday de las dos fuerzas como campos. El sistema de ecuaciones resultante explicaba muchos fenómenos conocidos y predecía algunos inesperados, pero lo más importante fue la predicción que hizo Maxwell de que un campo eléctrico oscilante en el espacio podía generar un campo magnético que oscilara a la misma frecuencia, que, a su vez, podía inducir un campo eléctrico, y así sucesivamente. Esta onda "electromagnética" se propagaba necesariamente a la velocidad de la luz, que era, ella también, un tipo de radiación electromagnética.

Maxwell murió a la edad de cuarenta y ocho años en 1879, nueve antes de que el genio alemán Heinrich Hertz verificase su predicción detectando ondas electromagnéticas en el espacio. Casi inmediatamente después, Oliver J. Lodge (más tarde Sir Oliver) —quien había sido uno de los más ardientes defensores de Heaviside— detectó ondas electromagnéticas en cables metálicos. Sólo entonces la mayoría aceptó la teoría de Maxwell como doctrina válida.

Heaviside no necesitó de tal confirmación. Consideró la teoría "una verdad obvia" por su potencia matemática, a la que juzgaba trabajo de "un genio nacido del cielo". Así describe sus primeras impresiones sobre el *Tratado* en una carta fechada en 1918: "Yo vi que era grande, magnífica, la mejor, que su potencia matemática tenía prodigiosas posibilidades. Entonces tomé la determinación de sentarme a trabajar para dominar el libro... Tardé varios años en comprender todo cuanto estaba al alcance de mis posibilidades. Luego dejé a Maxwell a un lado para seguir mi propio camino. Y avancé a paso más ligero".

Heaviside simplificó las veinte ecuaciones de Maxwell escritas en función de veinte variables concentrando su esencia en dos ecuaciones escritas en función de dos variables (las variables describían los vectores del campo eléctrico y magnético). Buena parte de este trabajo teórico se realizó en paralelo con Hertz, quien hizo notar amablemente en su libro sobre ondas eléctricas que "a Mr. Heaviside le correspondía la



2. RADIACION SUPERLUMINOSA, predicha por Heaviside décadas antes de que fuera observada como un brillo azulado que rodea fuentes de electrones de alta energía, como ocurre en el reactor Triga Mark II Research, de la Universidad de Cornell (*fotografía*). Esta radiación de Cerenkov aparece cuando una partícula cargada sobrepasa la velocidad de la luz en un medio denso, creando una onda electromagnética de choque de forma cónica (*diagrama*). La ecuación (*izquierda*) describe ϕ, el semiángulo del cono, en función de c, velocidad de la luz en el vacío, n, el índice de refracción del medio, y v, la velocidad de la partícula. Cuando v se hace igual a c, el ángulo es máximo (unos 41 grados en el agua). A medida que la partícula pierde velocidad, el cono se colapsa y desaparece.

prioridad". George Francis Fiztgerald, del Trinity College de Dublín, escribió: "Al tratado de Maxwell le estorbaban los escombros de sus brillantes líneas de asalto, de sus campos atrincherados, de sus batallas. Oliver Heaviside los ha limpiado, ha abierto un camino directo, lo ha ensanchado y ha explorado una parte importante del país".

Esta fue una fina alabanza por parte de un hombre que más tarde se haría famoso por ser el codescubridor de la contracción de Lorentz-Fiztgerald. Durante algunos años las ecuaciones reformuladas se conocieron por ecuaciones de Hertz-Heaviside; más tarde, el joven Einstein se refirió a ellas como las ecuaciones de Hertz-Maxwell. Hoy sólo se menciona el nombre de Maxwell.

Tan importantes como sus resultados, fueron los métodos de Heaviside. Con Josiah Willard Gibbs, de la Universidad de Yale, enseñó teoría vectorial a sus colegas del mundo de la física. Los vectores describían las fuerzas como magnitudes direccionales. Un vector puede representar la fuerza en un punto; un sistema de vectores puede describir un campo de fuerzas. Se puede acometer, con ellos, las operaciones de la aritmética o del cálculo; por dar un ejemplo, la diferenciación de un sistema de vectores que describe un campo magnético produce el vector para el flujo eléctrico en cualquier punto dado.

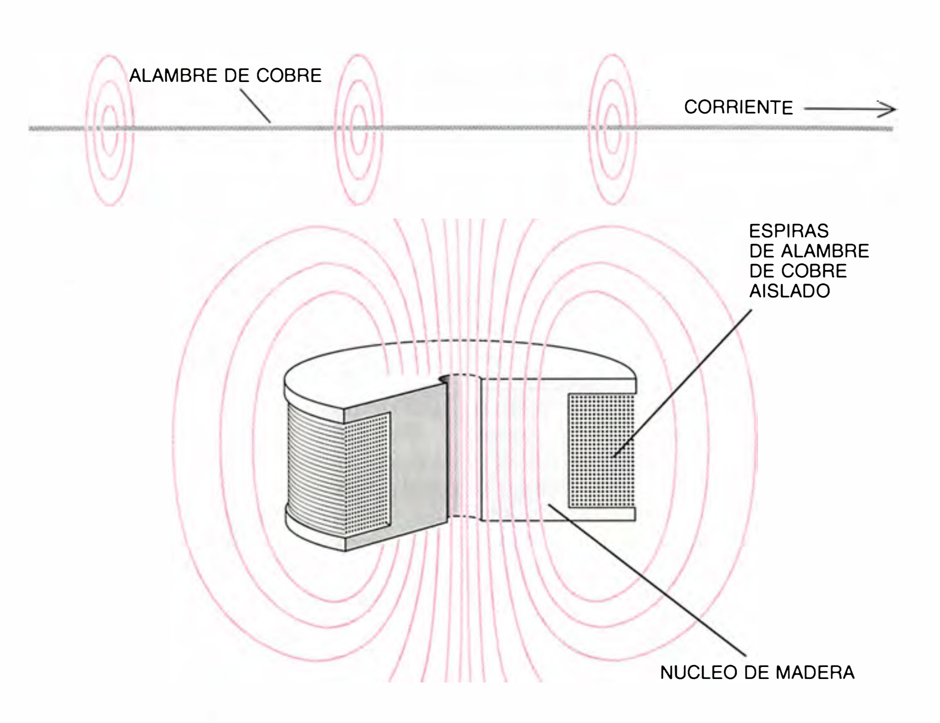
Las operaciones con vectores, sin embargo, pueden resultar complicadas. El vector producto de los vectores **a** y **b** no es igual que el de **b** por **a**. Pero los vectores no son, ni mucho menos, tan complicados como los cuaterniones de los cuales derivan.

Los cuaterniones —que añaden una variable escalar a las tres coordenadas direccionales— habían sido introducidos a principios del siglo XIX por un matemático irlandés, William Rowan Hamilton, y fueron defendidos frente a los vectores por Peter Guthrie Tait, un físico escocés amigo de Maxwell y Kelvin. Ni Maxwell ni Kelvin se ocuparon mucho de los cuaterniones, pero ambos se mostraron orgullosos de declarar sus objeciones y pasar a otras materias. Tait, sin embargo, batalló amargamente por la "vieja matemática", luchando contra Heaviside y Gibbs a través de numerosas cartas que enviaba al editor de *Nature.*

Las matemáticas de Heaviside (nuestro "cálculo operacional") no se ganaron el "imprimatur" de los *Proceedings of the Royal Society*, cuyo asesor matemático, William Burnside, rechazó el tratado de Heaviside por falta de rigor. Este lo reconoció, pero con su característico desdén por "la disección lógica" replicó: "Bueno, y ¿qué? ¿Debería rehusar mi cena sólo porque no entiendo completamente el proceso de digestión?" Por ironía de las cosas, quien tuvo que informar a Heaviside de su rechazo, lord Rayleigh, profesor de física en la cátedra Cavendish de la Universidad de Cambridge, sería uno de los mayores admiradores de sus innovaciones matemáticas.

Al final, los vectores obtuvieron una victoria cuyo alcance fue tan aplastante que borró de la memoria a sus creadores. Los libros de texto reescriben vectorialmente la teoría de Maxwell, y al hacerlo nos parecen obvios esos términos de expresión. La verdad es que el trabajo pionero de Heaviside fue bastante más duro. Esa reformulación ahistórica, propia de la didáctica de la ciencia, ha privado a dos generaciones del reconocimiento debido, la única remuneración de un sabio.

La siguiente gran aplicación de la teoría de Maxwell vino en 1884, cuando Heaviside y John Henry Poynting describieron el camino que seguía la energía electromagnética en el espacio. Avanzaron igualados, aun cuando Poynting llegara primero a la imprenta, justificando así el nombre moderno de vectores de Poynting; la denominación resulta apropiada, ya que los vectores señalan ("point") la dirección del flujo de energía en cualquier punto del espacio.



3. LOS INGENIEROS HABIAN EVITADO LA INDUCCION en los circuitos de larga distancia porque retrasaba la transmisión. Se produce la demora cuando el campo magnético inducido por una corriente (*arriba*) almacena brevemente y luego descarga la energía de la señal. Pero Heaviside demostró que, al añadir inductancia a un circuito, se permitía la transmisión sin distorsión, una cuestión más importante que la lentitud. George A. Campbell, de la compañía American Bell, diseñó los primeros solenoides (*abajo*); en ellos el campo inducido de cada arrollamiento refuerza el de sus vecinos, por lo que el solenoide aporta más inductancia que resistencia. Cada solenoide de los 300 de prueba de Campbell añadía 0,11 henry y 12 ohms a intervalos regulares de 50 kilómetros de cable.

En otros frentes, Heaviside impulsó la teoría de Maxwell más allá de lo que nunca hubiera podido soñar éste. Así, Heaviside se sentía fascinado por qué les ocurría a las partículas cargadas cuando corrían más deprisa que la luz; sus libros de notas estaban llenos de cálculos para describir el presumible comportamiento de dichas partículas "superluminosas". Un ejemplo de las condiciones superluminosas que se dan en medios cuya densidad es parecida a la del agua lo encontramos en la luz azulada de las piscinas de los reactores nucleares. Ello se debe a que los electrones emitidos desde el reactor superan la velocidad de la luz [*véase la figura 2*], produciendo una onda electromagnética de choque parecida al estruendo que provoca un avión al franquear la barrera del sonido. La onda de choque, que se nos manifiesta en forma de luz, recibe hoy la denominación de radiación de Cerenkov, en honor de Pavel A. Cerenkov, físico ruso que compartió el premio Nobel de 1958 por su trabajo sobre el fenómeno, cincuenta años después de que Heaviside lo hubiera predicho.

Por curioso que resulte, a pesar de que la teoría en vigor prohíbe que una partícula viaje a la velocidad de la luz en el vacío, no se viola ninguna ley si la partícula excede esa velocidad. Algunos teóricos lucubran con partículas para las cuales la velocidad de la luz en el vacío representa el límite "mínimo". La energía de esos taquiones, si existen, se aproxima a cero a velocidades infinitas, y, a infinito, a la velocidad de la luz. La teoría de la relatividad requeriría que viajaran retrocediendo en el tiempo, poniendo los efectos por delante de las causas y, por consiguiente, violando la noción de causalidad, que, sin embargo, no constituye ninguna ley de la física. Heaviside no sabía nada de estos efectos anticronológicos; ahora bien, si los taquiones cargados existieran, podrían detectarse a través de la "radiación Heaviside" que emitirían.

La brillante exposición y ampliación de la teoría de Maxwell que realizó Heaviside no pasó inadvertida. Aunque publicó la mayor parte de su trabajo en *Electrician*, una revista profesional para ingenieros, fue leída por un gran número de destacados académicos. Maxwell mismo publicó una nota en ella. La elite científica estaba, pues, enterada de lo que Heaviside llevaba entre manos.

En su discurso inaugural como primer presidente de la Institución de Ingenieros Eléctricos en 1889, Thomson (convertido ya en sir William) declaraba con energía que Heaviside era una "autoridad". Ese mismo año, Lodge lo describiría así para los lectores de *Nature*: alguien "cuyas profundas investigaciones sobre ondas electromagnéticas penetraron más allá de lo que nadie todavía es capaz de comprender".

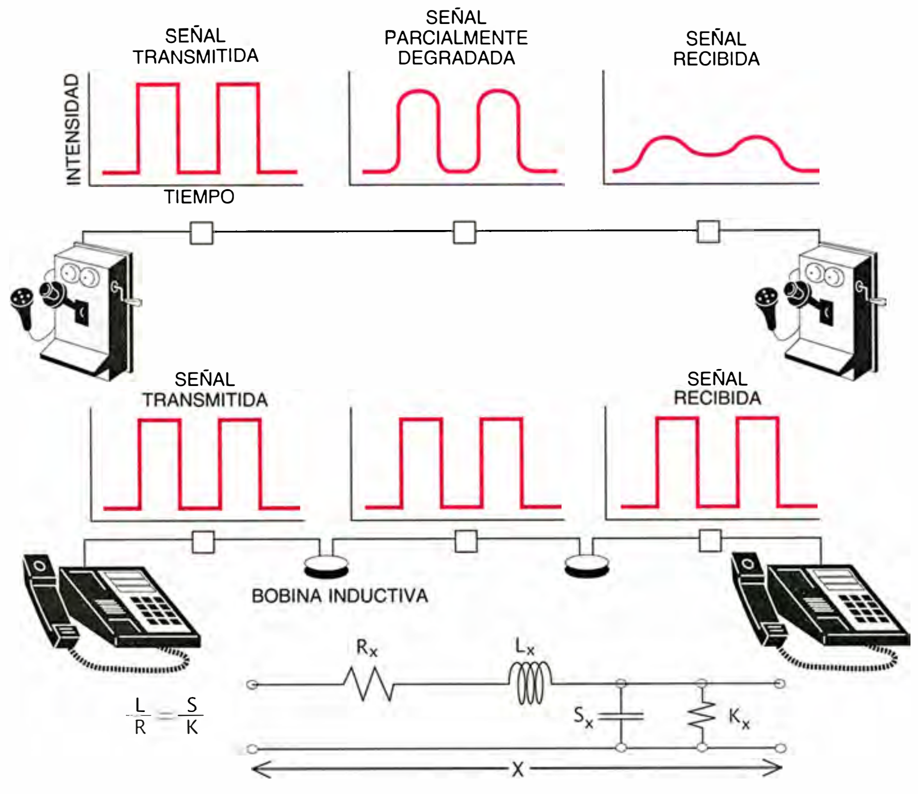
Dos años después, Heaviside fue elegido miembro de la Regia Sociedad Londinense. Contó con los votos de Thomson, Lodge, Fiztgerald y Poynting. Ser F.R.S. ("Fellow of the Royal Society") constituye hoy un gran honor; mayor lo era en 1891, cuando no proliferaban tanto los premios científicos. En sólo diecisiete años, Heaviside había pasado de la oscuridad del empleado de telégrafos al mundo de la fama internacional.

Todo esto parece sacado de una película de Hollywood. Lo cierto es que Heaviside aceptó su nombramiento con sentimientos encontrados, feliz por ser reconocido y temeroso de caer derribado por las mismas manos que ahora lo aplaudían. Esta actitud a la defensiva admite su explicación en el contexto de los acontecimientos de la década anterior, cuando Heaviside se vio envuelto en múltiples y desagradables disputas, de las que muchas veces no se sabía quien salía victorioso.

El amable discurso de Thomson ante la Institución encerraba un significado especial para una audiencia que había seguido la controversia entre Heaviside y el mayor de sus enemigos, William H. Preece, experto técnico de la GPO. Preece se definía a sí mismo como "un hombre práctico", con poco respeto hacia los teóricos que obscurecían su trabajo con un velo matemático; tenía, además, las ideas muy claras sobre cómo construir un circuito de comunicaciones. Heaviside publicó sus puntos de vista, no menos firmes y totalmente contrarios a los de Preece; ambos intercambiaron comentarios sarcásticos en la prensa. La violencia creciente de su disputa provocó que se cruzaran apuestas.

Un debate tan acalorado acerca de los principios fundamentales de la electricidad, a finales de la década de 1880, podría parecer pintoresco. La telecomunicación había alcanzado un nivel de desarrollo que, si todavía resulta impresionante, en aquella época rozaba la magia. Los mensajes se transmitían de una ciudad a otra, de un continente a otro, a través de grandes cables vehiculados por mecanismos ingentes. A decir verdad, la mayoría de los progresos en la práctica de la telecomunicación y en la fabricación de soportes se realizaron sin apenas contar con la ayuda de la teoría. La única base matemática que entonces estaba al alcance era un análisis del flujo eléctrico a muy baja frecuencia transmitido a través de cables muy largos, que Thomson había presentado treinta años antes. Esta teoría servía para ritmos de transmisión de pocas palabras por minuto, pero fallaba completamente en las transmisiones telefónicas, que requerían frecuencias muchísimo más rápidas.

El problema que clamaba por una solución era el de cómo mantener una señal de alta frecuencia sin que se distorsionase a su paso por un circuito. Cierta distorsión era inevitable; por ejemplo, la que causa la resistencia eléctrica, que absorbe energía de la señal convirtiéndola en calor inservible. Se pueden producir distorsiones ulteriores por fenómenos de inductancia y capacitancia, que son el resultado de la acumulación en campos magnéticos y eléctricos, respectivamente, de energía de la señal du-



4. LA DISTORSION destruye una señal haciendo que sus componentes de alta frecuencia sobrepasen a los de baja frecuencia, convirtiendo su pulso nítido en ruido indistinguible (*arriba*). Las transmisiones que están libres de distorsión (*centro*) incorporan la carga de inducción para equilibrar la ecuación (*centro, con diagrama del circuito*) de inductancia *L*, resistencia lineal *R*, capacitancia *S* y pérdidas a tierra *K*, causada por la pérdida entre las dos ramas (de ida y vuelta) del circuito.

rante un breve período de tiempo. La chispa que se produce en el enchufe de un tostador al desconectarlo es el efecto del almacenamiento inductivo, que es la energía cedida por el colapso de un campo magnético inducido por una corriente eléctrica. Por otra parte, un condensador almacena energía en un campo eléctrico que puede persistir incluso después de que desconectemos el circuito que lo genera. Los condensadores de alto voltaje son los culpables del peligro que encierra fisgonear en una instalación de televisión desenchufada.

Como muy bien sabía Thomson, los efectos de capacidad eran responsables de la mayoría de los efectos de almacenamiento que se producían en los cables transoceánicos en la década de los cincuenta del siglo pasado. Pero también sabía que, en las señales de baja frecuencia que por aquel entonces se utilizaban, podían despreciarse, sin ningún riesgo, el efecto inductivo del magnetismo y las pérdidas a tierra de la resistencia.

Aunque incompleta, la teoría de Thomson adquirió gradualmente el estatuto de verdad incontrovertible entre quienes no estaban informados de sus simplificaciones teóricas. Pero esa simplificación, razonable en los albores del telégrafo, acabó siendo indefendible cuando se aplicaba a los circuitos más rápidos desarrollados por el telégrafo multiplex (en el que un solo cable transmite diferentes mensajes simultáneamente) y por la telefonía. Estos circuitos quedaron sujetos a los efectos destructores de la inducción magnética.

Un primer efecto fue la demora en la transmisión, resultado de un almacenamiento transitorio de la energía de la señal en el campo magnético del circuito. El tiempo que tarda la energía en entrar y salir del campo limita la velocidad máxima del circuito. Además, la pérdida de energía en el proceso atenúa la señal, única razón por la que a Preece y a otros les desagradaba la inducción, cuando pensaban en ella.



5. JAMES CLERCK MAXWELL (1831-1879) fue un adelantado de la teoría electromagnética, en un abstruso tratado que Heaviside más tarde juzgaría como el trabajo de un "genio nacido del cielo". Este abandonó su trabajo, a los veinticuatro años, para dedicarse a generalizar la teoría de aquél.

El segundo efecto de la inducción resultó incluso más enojoso. Afectaba a diferentes componentes de la señal de manera distinta. Una señal no es más que una onda compleja, analizable dentro del espectro de ondas simples sinusoidales, dotada cada una de su frecuencia y amplitud características [véase "La transformación de Fourier", por Ronald N. Bracewell; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 1989). Ocurre que las altas frecuencias fluyen a lo largo de las vías de transmisión con mayor celeridad que lo hacen las bajas frecuencias; pierden, además, más energía en el proceso. Alcanzan, por tanto, su destino antes de tiempo, si gozan de capacidad para conseguirlo.

Aunque una telegrafía elemental evita el problema filtrando las altas frecuencias, ese recurso no valdrá en telefonía. El código Morse más rápido que una mano humana puede operar carece de componentes esenciales por encima de los 100 hertz (ciclos por segundo); el habla normal requiere componentes de miles de hertz. En los primeros teléfonos de Alexander Graham Bell, la combinación de ondas necesarias permanecía inteligible sólo durante unas decenas de kilómetros antes de que la señal se perdiera. Un impulso inicial claro y vigoroso, pensemos en aquellos cuya gráfica de intensidad en el tiempo se asemejara a la letra **M**, no tardaba en convertirse en un revoltijo borroso, parecido a la sección transversal del neumático desgastado de un automóvil [*véase la figura 4*].

La atmósfera dispersa muy poco las ondas de radio (excepto en la ionosfera, cuya existencia fue Heaviside de los primeros en postular); el cable metálico las dispersa bastante, y el agua muchísimo. Esa distinta dispersión explica por qué la radiofonía sin hilos fue la primera en transmitir el habla a través de los océanos antes de que se pudiesen fabricar cables adecuados para ello. También explica por qué la Marina de los Estados Unidos no puede todavía enviar órdenes en viva voz a sus submarinos sumergidos. La Marina se ha propuesto remediar la situación construyendo un sistema de radiodifusión de muy baja frecuencia con una antena subterránea que abarque cientos de kilómetros cuadrados.

Preece no entendió estos fenómenos. Se limitó a afirmar que la inducción magnética era un callo que podía y debía extirparse con un correcto diseño de circuitos, como si pudiera suprimirse una propiedad inherente a la electricidad. Peor aún. No acertó a comprender por qué Heaviside quería extender el alcance del teléfono. "Tengo uno en mi oficina", declaró en cierta ocasión, "pero sólo para enseñarlo; no lo utilizo porque no me gusta. Si quiero mandar un mensaje a otra habitación, utilizo un megáfono o contrato a un chico para que lo haga".

Preece llegó a su diseño de circuitos sin distorsión generalizando la ley de los cuadrados, de Thomson; a tenor de la misma, una señal introducida en el extremo de un circuito alcanza su



INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**

ha publicado sobre el tema, entre otros, los siguientes artículos:

Comunicaciones ópticas por cables submarinos, Raimundo Díaz de la Iglesia.
Número 117, junio 1986.

Nuevos metales, Bernard H. Kear.
Número 123, diciembre 1986

Nuevas cerámicas, H. Kent Bowen.
Número 123, diciembre 1986

Nuevos polímeros, Eric Baer.
Número 123, diciembre 1986

Materiales para el transporte terrestre, W. Dale Compton y Norman Louis A. Girifalco.
Número 123, diciembre 1986

Materiales para la navegación aerospacial, Morris A. Steinberg.
Número 123, diciembre 1986

Nuevos materiales y economía, Joel P. Clark y Merton C. Flemings.
Número 123, diciembre 1986

Materiales para la información y la comunicación, John S. Mayo.
Número 123, diciembre 1986

Electrones balísticos en semiconductores, Mordehai Heiblum y Lester F. Eastman.
Número 127, abril 1987

Transistores de arseniuro de galio, William R. Fresley.
Número 133, octubre 1987

Fractura del vidrio, Terry A. Michalske y Bruce C. Bunker.
Número 137, febrero 1988

Plásticos que conducen electricidad, Richard B. Kaner y Alan G. MacDiarmid.
Número 139, abril 1988

El dispositivo de efecto cuántico, ¿transistor del mañana?, Robert T. Bate.
Número 140, mayo 1988

máxima intensidad en el otro extremo después de un retraso proporcional al cuadrado de la longitud del cable. Pero esta ley sólo se puede aplicar en cables cuya longitud nos permita despreciar el almacenamiento magnético, un dato que Preece ignoraba.

Podemos afirmar que, con el artículo que publicó en 1887, donde formulaba una ecuación para calcular la longitud máxima que podía tener un circuito telefónico sin distorsiones, bloqueó el desarrollo de la telecomunicación británica durante casi veinte años. Su ecuación ponía en relación la resistencia y capacitancia totales y por unidad, la longitud total y un conjunto de parámetros arbitrarios para los materiales y la geometría de los circuitos. A pesar de su manipulación continua de los parámetros, nunca consiguió que éstos dieran cuenta de todos los hechos: un circuito telefónico, que se alejaba bastante de su ecuación, mantenía bien comunicada Boston con Chicago.

Heaviside atacó la teoría de Preece tres meses después en *Electrician*. Sentaba allí las condiciones requeridas para transmitir una señal sin distorsión: la razón entre la inductancia y la resistencia *a lo largo* de un circuito tenía que ser igual a la razón entre la capacitancia y la pérdida a tierra *a través* del circuito [*véase la figura 4*]. Gustaba Heaviside de sembrar sus matemáticas con referencias maliciosas a Preece, a quien tildaba de "cientificucho". Pero lo que más debió exasperar a éste fue la sugerencia de que, para diseñar un circuito sin interferencias, había que incrementar la inducción, no menguarla.

Heaviside ideó un dispositivo en forma de una bobina fuertemente arrollada, un solenoide, cuyo electromagnetismo concentrado aumentaría la inductancia del circuito sin añadir mucha resistencia al mismo. Heaviside le indicó a su hermano Arthur que la GPO podía contruir esa bobina de almacenamiento inductivo, pero se volvió atrás al enterarse de que Preece tenía derecho de veto de cuantas propuestas de investigación se le ofrecieran a la GPO. Ni que decir tiene que Preece hubiera ejercido ese derecho en este caso. La patente de la bobina se le concedió a Michael I. Pupin, profesor de la Universidad de Columbia, una década más tarde. George A. Campbell, empleado en la compañía American Bell, diseñó la primera bobina comercial en el cambio de siglo. Heaviside no recibió ni remuneración ni reconocimiento a este respecto.

Necesitaba, sobre todo, dinero. Su padre había muerto y los derechos por su voluminosa *The Electromagnetic Theory* no bastaban. La estrechez se subsanó con una pensión que el estado le había concedido en 1896, a sugerencias de Fiztgerald y otros distinguidos científicos.

Heaviside acometió su siguiente controversia pública sin rencores, quizá porque tenía en frente a su amigo Thomson, ahora Lord Kelvin. Centrábase el debate en el problema de la edad de la Tierra, calculada según modelos que medían el tiempo requerido para que el planeta radiara una presunta reserva inicial de calor. En aquel momento nadie se dio cuenta de que la desintegración radiactiva del núcleo aportaba una fuente activa de calor. La hipótesis de Kelvin según la cual el calor se había difundido, de forma ascendente, a través de las distintas capas geológicas a ritmo uniforme le llevó a fijar la edad máxima de la Tierra en 98 millones de años, período demasiado corto para que la selección natural hubiera intervenido a tenor de lo establecido por Darwin. Heaviside partió, sin embargo, de la existencia de dos ritmos de difusión, uno para el interior y otro para la corteza, y cifró la edad del planeta en 300 millones de años, por lo menos. Fue su canto del cisne: desapareció de las columnas de opinión poco antes del cambio de siglo; hacia 1908, se mar-

ELECTROMAGNETIC INDUCTION AND ITS PROPAGATION.—XL.

BY OLIVER HEAVISIDE.

(Continued from page 51.)

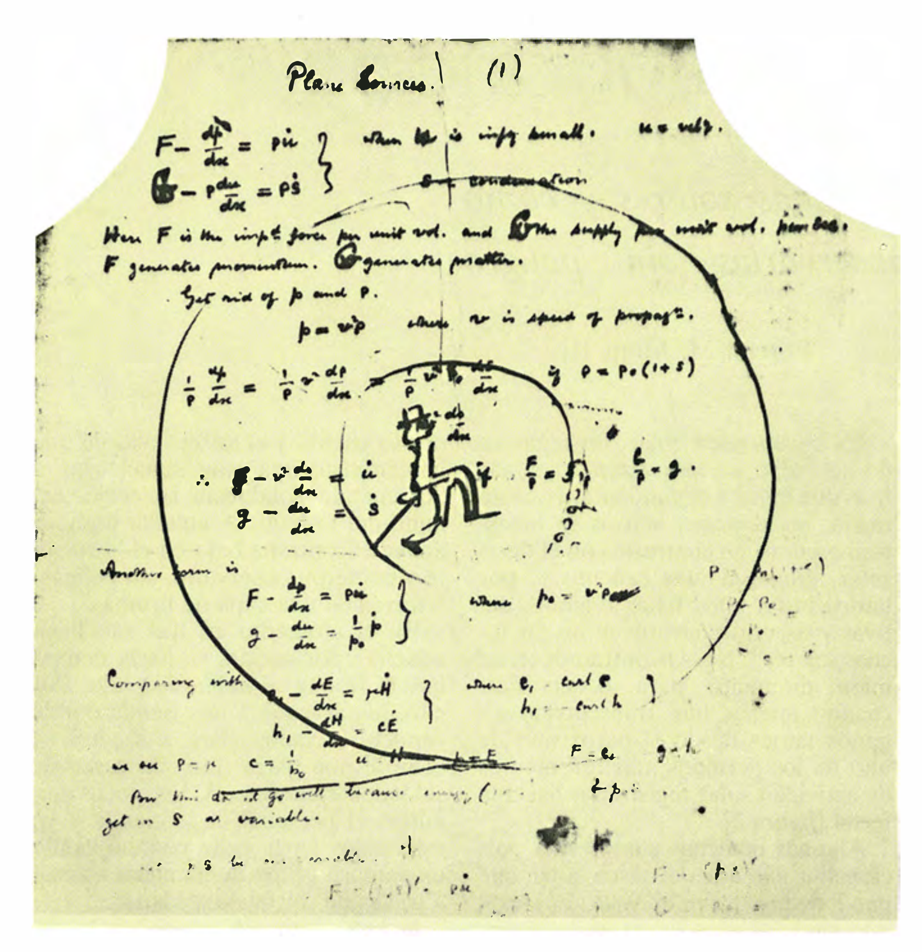
Preliminary to Investigations concerning Long-distance Telephony and Connected Matters.

Although there is more to be said on the subject of induction balances, I put the matter on the shelf now, on account of the pressure of a load of matter that has come back to me under rather curious circumstances. In the present article I shall take a brief survey of the question of long-distance telephony and its prospects, and of signalling in general. In a sense, it is an account of some of the investigations to follow.

Sir W. Thomson's theory of the submarine cable is a splendid thing. His paper on the subject marks a distinct step in the development of electrical theory. Mr. Preece is much to be congratulated upon having assisted at the experiments upon which (so he tells us) Sir W. Thomson based his theory; he should therefore have an unusually complete knowledge of it. But the theory of the eminent scientist does not resemble that of the eminent scienticulist, save remotely.

But all telegraph circuits are not submarine cables, for one thing; and, even if they were, they would behave very differently according to the way they were worked, and especially as regards the rapidity with which electrical waves were sent into them. It is, I believe, a generally admitted fact that the laws of Nature are immutable, and everywhere the same. A consequence of this fact, if it be granted, is that all circuits whatsoever always behave in exactly the same manner. This conclusion, which is perfectly correct when suitably interpreted, appears to contradict a former statement; but further examination will show that they may be reconciled. The mistake made by Mr. Preece was in arguing from the particular to the general. If we wish to be accurate, we must go the other way to work, and branch out from the general to the particular. It is true, to answer a possible objection, that the want of omniscience prevents the literal carrying out of this process; we shall never know the most general theory of anything in Nature; but we may at least take the general theory so far as it is known, and work with that, finding out in special cases whether a more

6. EXPOSICION de la carga inductiva, en este facsímil del trabajo original de Oliver Heaviside donde describía su teoría; corresponde al número del 3 de junio de 1887 de la revista *Electrician*.



7. OTRA CARA DE HEAVISIDE, menos envarada, nos la ofrece este divertimento que encontramos en uno de sus densos apuntes matemáticos. Dejó todo un conjunto de dibujos, muy detallados, que nos muestran que había heredado algunas de las predilecciones artísticas de su padre, tallista grabador.

chó a Torquay, en la costa sur de Inglaterra.

Allí su F.R.S. y otros honores no significaban nada entre sus vecinos, quienes le trataban como a un personaje burlesco. La soledad y los achaques de la edad alimentaron su natural complejo persecutorio. Beverly Nichols, un novelista que vivió sus años juveniles en la casa de al lado, le recordaba como un eremita extraño y amargado que firmaba sus cartas con el extravagante título de W.O.R.M. ("gusano"). Las cartas no transcendieron, excepto por esa palabra —que reflejaba la idea que Heaviside tenía de lo que otros opinaban de él—. En cierta ocasión, escribe Nichols, cambió su mobiliario sustituyéndolo por bloques de granito "que permanecían en las habitaciones desangeladas como los muebles de un gigante del Neolítico. Deambulaba por esas habitaciones fantásticas, cada vez más y más sucio y descuidado —menos sus uñas, que permanecían exquisitamente cuidadas y pintadas de un brillante color rosa-cereza".

Heaviside murió en febrero de 1925, probablemente como resultado indirecto de una caída por las escaleras que había sufrido meses antes. Yace enterrado en la tumba de sus padres; su nombre sólo se lee cuando la hierba está recién cortada. La próxima vez que usted haga una llamada a larga distancia, y la voz al otro extremo le llegue clara y nítida, reflexione un momento sobre este hombre extraño pero de gran talento que lo hizo posible.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HEAVISIDE'S OPERATIONAL CALCULUS AND THE ATTEMPTS TO RIGORISE IT. Jesper Lützen en *Archive for History of Exact Sciences*, vol. 21, págs. 161-200; 1979.

"PRACTICE VS. THEORY": THE BRITISH ELECTRICAL DEBATE, 1888-1891. Bruce J. Hunt en *Isis*, vol. 74, n.º 273, págs. 341-355; septiembre de 1983.

FROM MAXWELL TO MICROPHYSICS. Jed Z. Buchwald. University of Chicago Press, 1985.

OLIVER HEAVISIDE: SAGE IN SOLITUDE. Paul J. Nahin. IEEE Press, 1988.

Taller y laboratorio

Manchas solares y cómo observarlas sin peligro

Forrest M. Mims III

Para un observador ocasional, el Sol se presenta inmutable. El astro parece lucir constantemente despidiendo una brillante luz blanca que cambia a rojo y amarillo sólo cuando la difunden o absorben las partículas y vapores contenidos en la atmósfera de nuestro planeta. Pero la observación atenta nos muestra un Sol mucho más dinámico que la Tierra. En su superficie estallan periódicamente tormentas de una magnitud enorme, verdaderos cataclismos cuya extensión podría abarcar varios planetas del tamaño del nuestro.

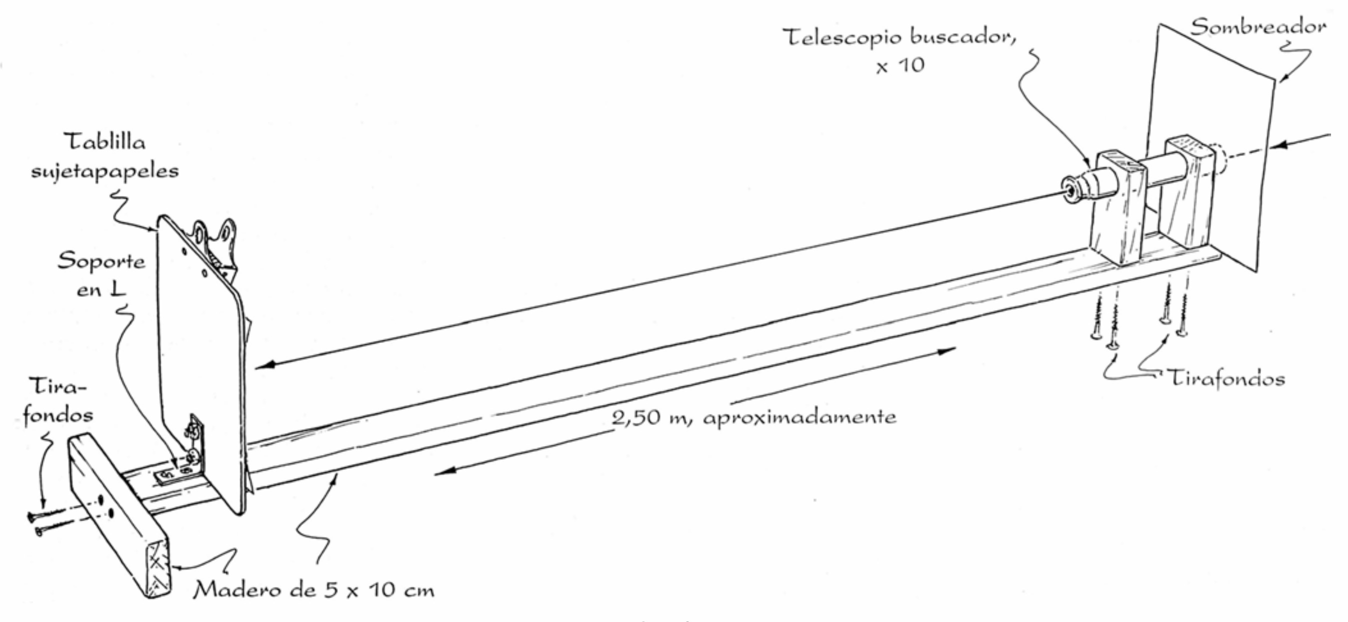
ADVERTENCIA: La observación del Sol a simple vista o mediante cualquier instrumento de aumento puede dañar gravemente la vista y provocar incluso ceguera irreversible. Si el lector se propone llevar a cabo alguno de los experimentos que se describen en esta sección, habrá de seguir escrupulosamente las instrucciones que se exponen. Los niños no deben intentar realizar estas observaciones sin la supervisión de un adulto.

En la superficie solar, las regiones de actividad intensa están algo más frías que la zona circundante. Por esta razón, las regiones activas se muestran oscuras, en contraste con el disco solar, que está más caliente y, por tanto, brilla más. Estas regiones activas y oscuras constituyen las "manchas solares". Nos encontramos en un buen momento para observarlas, cuando apenas han transcurrido algunos meses desde el paroxismo de uno de los períodos más turbulentos de actividad solar registrados hasta la fecha [*figura 2*].

Algunas manchas cubren una porción tan extensa del disco solar que pueden verse a simple vista. Es cierto que ya 1700 años antes de la invención del telescopio los astrónomos chinos observaban manchas solares sin el concurso de dispositivos ópticos. Mas, a pesar de conocer desde hacía tiempo la existencia de informes tan antiguos, hasta marzo de 1989 no tuve ocasión de observar personalmente manchas solares sin telescopio. Dos amigos me informaron, cada uno por su cuenta y el mismo día, de que habían visto una gran mancha en el Sol cuando conducían su coche camino del trabajo. A aquella hora, el Sol se encontraba bajo en el horizonte y pudieron observarlo, sin peligro, a través de una capa de bruma.

En el momento en que me llegó aquella información, ya hacía tiempo que la bruma se había disipado. Por ello, me acerqué a una tienda donde venden artículos para soldadura y compré una placa filtro de casco de soldador eléctrico. A los pocos minutos, el personal de la tienda y yo estábamos en la calle contemplando un extenso grupo de manchas solares a través de filtros de soldador.

Habrá observadores del Sol más académicos que recuerden por su nombre oficial a este desacostumbrado grupo de más de 50 manchas; era la región 5395. Gracias a la gran difusión que se le dio en los medios de comunicación, el resto de nosotros recuerda a este conglomerado de manchas que constituía la región 5395 por la erupción solar que produjo, que a



1. Observatorio solar de construcción casera.

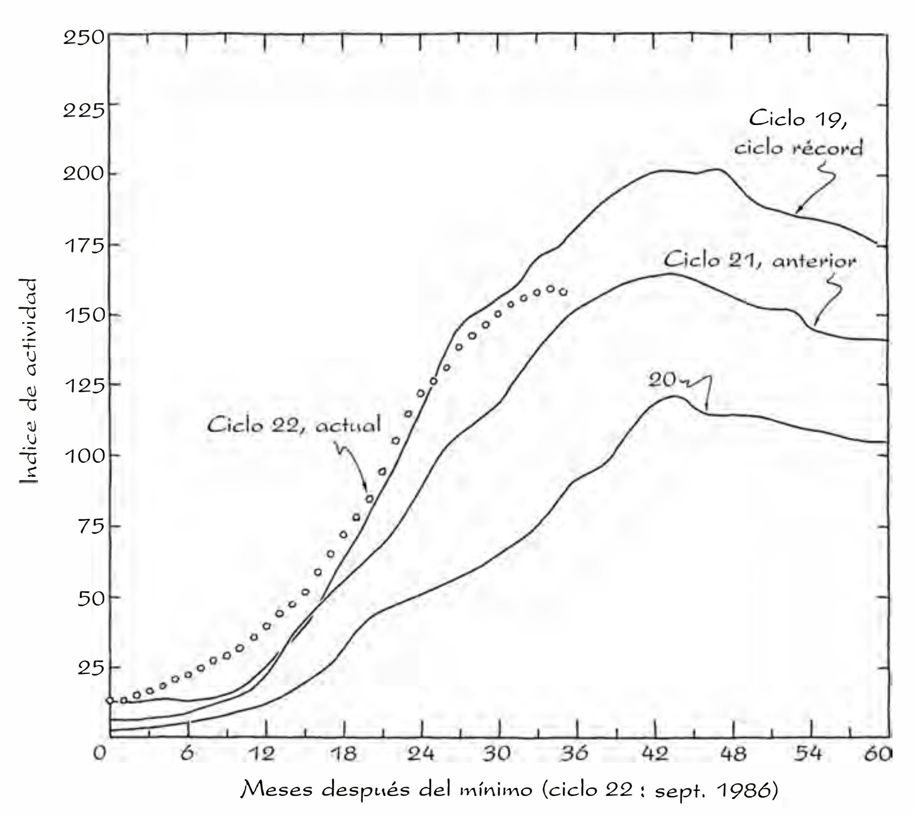
su vez creó una espectacular manifestación luminosa en el firmamento nocturno de la mayor parte del hemisferio Norte. Esta manifestación luminosa, conocida como aurora boreal, se dejó ver incluso desde los cayos de Florida y Cancún.

Cuando una aurora boreal se observa tan hacia el sur, podemos asegurar que hay quien maldice su estampa. Acontece que el aumento de actividad solar responsable de esa aurora puede tener efectos perjudiciales en la superficie terrestre o sus proximidades. Así, pueden resultar alteradas las órbitas de los satélites, en especial las de baja altitud, interrumpirse las radiocomunicaciones y sufrir perturbaciones e incluso apagones las redes de suministro eléctrico.

Tales desbarajustes los causó la región 5395 en un grado más que molesto y de ellos ha preparado una recopilación Joe H. Allen, del Centro Mundial de Datos A para la Física Solar y Terrestre en Boulder (Colorado). En Nuevo México y Nueva York hubo fluctuaciones y cortes en el suministro eléctrico. El 13 de marzo, seis millones de residentes de la provincia de Quebec se quedaron sin electricidad durante nueve horas o más. Esos apagones les costaron a las compañías eléctricas un total de 187 millones de kilowatt-hora.

La región 5395 fue culpable también de numerosas dificultades que sufrieron los sistemas de radiodifusión. La atmósfera superior terrestre refracta las radioseñales, aunque las absorbe cuando recibe el bombardeo de una radiación solar intensa. Pero con las señales de alta frecuencia ocurre lo contrario; o sea, se propagan hasta mucho más allá de su alcance usual. Mientras duró la región 5395, tales efectos brindaron no pocas experiencias interesantes a los operadores de sistemas de radiocomunicación, tanto aficionados como profesionales. Esos efectos explican también por qué algunos habitantes de California se quejaron de que las puertas de sus garajes, que funcionaban por control remoto, se abrían y cerraban solas. Parece probado que ese fenómeno lo causó un transmisor de la Armada próximo al lugar. La estación tuvo que cambiar su frecuencia de operación, al haber quedado inutilizadas sus frecuencias normales por los efectos del Sol en la ionosfera.

Pero, pese a todos los problemas que puedan crear, la observación de las manchas solares constituye un auténtico placer. Nos facilitarán, además, una mejor apreciación de la naturaleza dinámica del Sol si las observamos a diario durante un mes, poco más o menos. Esta ocupación la encontrará el lector muy informativa, y mucho más cómoda que la de los astrónomos, aficionados o profesionales, que estudian otros astros. Mientras éstos acostumbran no dormir en toda la noche al acecho de sus presas, nosotros podremos observar el Sol a cualquier hora del día. Podremos incluso observarlo a través de la neblina y desde el interior de cualquier habitación que tenga una ventana adecuadamente orientada.



2. Ciclo solar actual comparado con otros anteriores.

El modo más sencillo y rápido de buscar manchas solares es mirando al Sol directamente a través de un filtro adecuado, tal como hice yo durante la aparición de la región 5395. Es absolutamente esencial que el filtro atenúe la luz solar en el grado adecuado. Los filtros de soldador están numerados en función de la cantidad de luz que dejan pasar. Entre los comerciales, el filtro más oscuro es el de número 14. Este transmite 2,7 veces menos luz que un filtro del 13, el cual transmite 2,7 veces menos luz que un filtro del 12, y así sucesivamente. Sólo un filtro del 14 nos protegerá suficientemente la vista de la luz solar directa.

En el comercio se encuentran filtros de soldador al menos en dos tamaños: cinco por 10,8 centímetros y 11,4 por 13,3 centímetros. El pequeño nos proporciona la posibilidad de llevar siempre encima un pequeño observatorio solar que podremos utilizar durante los atascos de tráfico, en las pausas del almuerzo y en excursiones. Con el grande, que cabe en el bolsillo de una chaqueta o en un bolso, la observación es más agradable porque cubre la mayor parte de la cara. Un filtro pequeño me costó dos dólares y uno grande, casi cinco.

En algunas tiendas de artículos para soldadura se venden filtros de plástico recubierto de una película metálica. Aunque esos filtros tienen el mismo factor de atenuación que los de vidrio de tonalidad equivalente, un arañazo en la capa metálica puede dejar pasar rayos nocivos. Por ello, son preferibles los filtros de vidrio.

Cualquiera que sea el filtro de soldador que se adquiera, bajo ninguna circunstancia debe emplearse en combinación con un telescopio o unos gemelos. Estos instrumentos captan luz más que suficiente para dañar la vista, aunque nos hayamos protegido con un filtro. Además, un filtro de absorción de vidrio colocado entre el ojo y el ocular de un telescopio puede quebrarse con el intenso calor generado por la imagen ampliada del disco solar.

A través de un filtro de vidrio, el

Sol aparece amarillo o amarillo verdoso, y, dorado, a través de un filtro de plástico. El de vidrio podemos inclinarlo para aumentar la atenuación, maniobra útil cuando se intenta distinguir manchas solares pequeñas. Si no se descubren en primera instancia manchas que resalten, mírese el borde del Sol y luego el disco completo. Si hubiera manchas visibles, se nos manifestará entonces alguna de ellas al desplazar la vista desde fuera hacia el interior del disco. Por cierto, esto es precisamente lo que me ocurrió cuando, tal como explicaba al principio, salí a la calle a observar las manchas. La primera ojeada me presentó un disco solar límpido. Tras desplazar mi campo visual de un lado a otro varias veces, aparecieron de repente dos grandes manchas, a ambos lados del ecuador solar.

Un filtro grande permitirá al lector probar un truco para mejorar la visibilidad de las manchas que yo tuve la suerte de descubrir por puro azar. Sin dejar de observar el Sol a través del filtro, inclínese el borde superior de éste alejándolo de la frente hasta que podamos ver reflejado el azul del cielo [*figura 3*]. Una mancha azul cubrirá el disco solar y sus alrededores. Al estar inclinado el filtro, el Sol se verá más pálido. Por otra parte, la luz reflejada del cielo nos contraerá las pupilas, con lo que el Sol lo veremos aún más pálido. Según mi experiencia, esta técnica realza mucho la visibilidad de las manchas solares.

Este método de observación, bastante primitivo, puede resultar más eficaz de lo que de entrada cabría suponer. Como todavía seguimos cerca del máximo del actual ciclo de manchas solares de once años, quizá pudiéramos disfrutar de la oportunidad de examinar la evolución de un grupo grande de manchas. Por ejemplo, hacia finales de agosto de 1989, mi pequeño observatorio de bolsillo me reveló una mancha muy extensa en el limbo oriental del Sol. Tres días después, esa mancha había evolucionado hasta dividirse en dos manchas gigantes enlazadas, fenómeno que sorprendió incluso a los astrónomos profesionales. Al principio, se asignaron a las dos manchas nombres distintos: regiones 5669 y 5671. Pero, cuando los astrónomos estudiaron la estructura magnética de esas dos regiones, descubrieron que en realidad constituían un solo y enorme grupo de manchas. Por tanto, las regiones 5669 y 5671 quedaron agrupadas en una región única que se designó 5669.

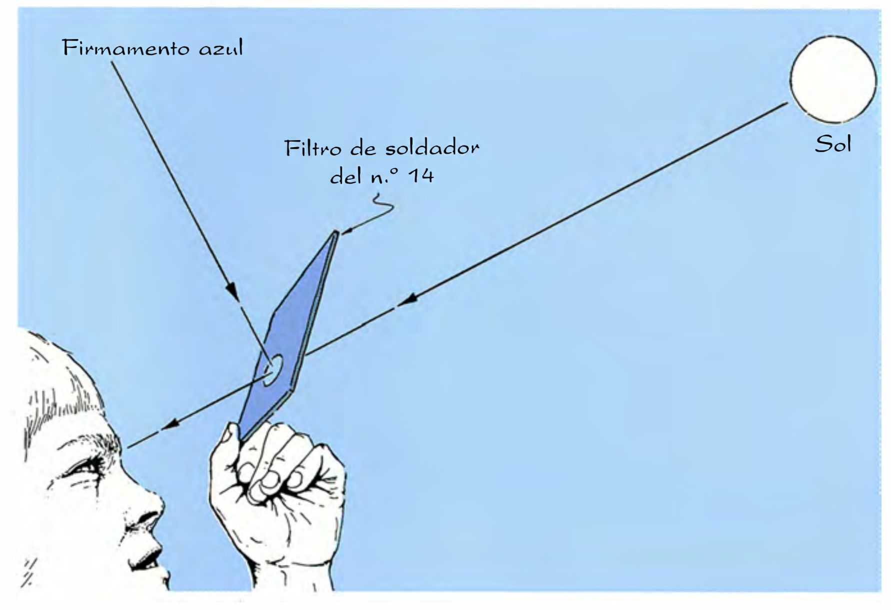
Tan extrañísimo grupo de manchas solares fue la fuente de intensas emisiones de ondas de radio, luminosas y rayos X. Durante casi dos semanas fui observando la región 5669, hasta que se ocultó tras el limbo occidental del Sol. Una mañana, pocos minutos después de la salida del Sol, tuve la rara oportunidad de verla a través de una neblina espesa con unas gafas de Sol ordinarias.

La región 5669 era tan grande y su geometría tan insólita que quise examinar su estructura con mayor detalle. Para ello me serví de unos gemelos con los que proyecté una imagen nítida del Sol sobre una hoja de papel. El procedimiento más sencillo para poner en práctica este método es montar los gemelos sobre un trípode de cámara fotográfica. En muchas tiendas de fotografía venden adaptadores que permiten montar distintos tipos de gemelos en trípode.

Bajo ninguna circunstancia hay que mirar por los gemelos al tratar de apuntarlos hacia el Sol. Tampoco debe dirigirse la vista paralelamente a su costado o por encima. Lo que hay que hacer es colocar una tapa de lente sobre una de las dos aberturas y apuntar los gemelos en la dirección aproximada al Sol. Luego se ajusta su posición observando su propia sombra. Cuando ésta presente su silueta más pequeña, los gemelos estarán casi correctamente alineados. En ese momento, se mueven poco a poco hasta que en la sombra aparezca una imagen desvaída del disco solar. Seguidamente, se alinean hasta que el disco solar quede centrado en la sombra. Cuando se consiga esto último, delante de la lente destapada se pondrá una cartulina traslúcida que oscurezca la imagen del Sol y la resalte más. Finalmente, a unos 20 o 30 centímetros de los gemelos se coloca una hoja de papel blanco o una cartulina y se enfocan cuidadosamente los gemelos hasta obtener la imagen más nítida.

Este método para observar por proyección las manchas solares puede ponerse en práctica con la mayoría de los gemelos y telescopios. Es, con mucho, el menos peligroso. Importa, no obstante, tener presente que la curiosidad puede impulsar a los niños a mirar por el ocular de un instrumento apuntando al Sol. Debe, pues, prestarse atención a los niños (y a los adultos menos avisados) que merodeen cerca de los instrumentos dirigidos hacia el astro. Téngase en cuenta que incluso una brevísima ojeada al disco solar a través de un pequeño telescopio puede producir una pérdida de visión permanente e importante. El lector debe percatarse además de que los gemelos o telescopios equipados con retículos pueden estropearse si se emplean para proyectar imágenes solares. La intensa luz concentrada puede quemar las cruces de hilo y fundir los retículos de plástico.

Quien disponga de un telescopio pequeño puede fácilmente montar un observatorio de proyección permanente. Tal hizo, hace dos años, mi hija aún adolescente Vicki Rae Mims, quien construyó el suyo con maderos viejos, una tablilla sujetapapeles, una pantalla de cartulina y un pequeño telescopio de 10 aumentos. El telescopio buscador extraído de un telescopio potente dará muy buenos resultados. En la figura 1 se ilustra el observatorio de Vicki. Si algún lector se construye su propio ob-



3. El reflejo del azul del cielo puede realzar la visibilidad de las manchas solares.

servatorio, quizá desee aumentar el tamaño de la imagen proyectada del disco solar aumentando la distancia entre el telescopio y la tablilla sujetapapeles.

Para utilizar nuestro observatorio, lo apoyaremos por la parte del telescopio sobre el pretil de una valla o bien sobre un peldaño de una escalera de tijera. Se retira la cartulina protectora y se mueve el artefacto por el extremo que descansa en el suelo, hasta que la sombra del telescopio quede centrada en la hoja de papel que habremos pinzado en la tablilla. Así tendremos el telescopio apuntado aproximadamente al Sol. Afinaremos la posición hasta que veamos el disco solar centrado en el papel. Por último, volveremos a colocar la cartulina para realzar la imagen del Sol.

Este sencillo sistema de proyección permite seguir el movimiento de las manchas en su travesía por el disco solar. Primero hay que centrar el disco sobre la hoja de papel sujeta en la tablilla. Se marcan luego algunos puntos del perímetro de la imagen proyectada y se dibuja la circunferencia definida por esos puntos. Ahora podemos añadir un sistema de coordenadas o un retículo que nos permitan especificar mejor la posición de los puntos de interés. Reservaremos espacios para la fecha, hora y comentarios. Esta hoja de papel servirá de estadillo y sacaremos copias de ella.

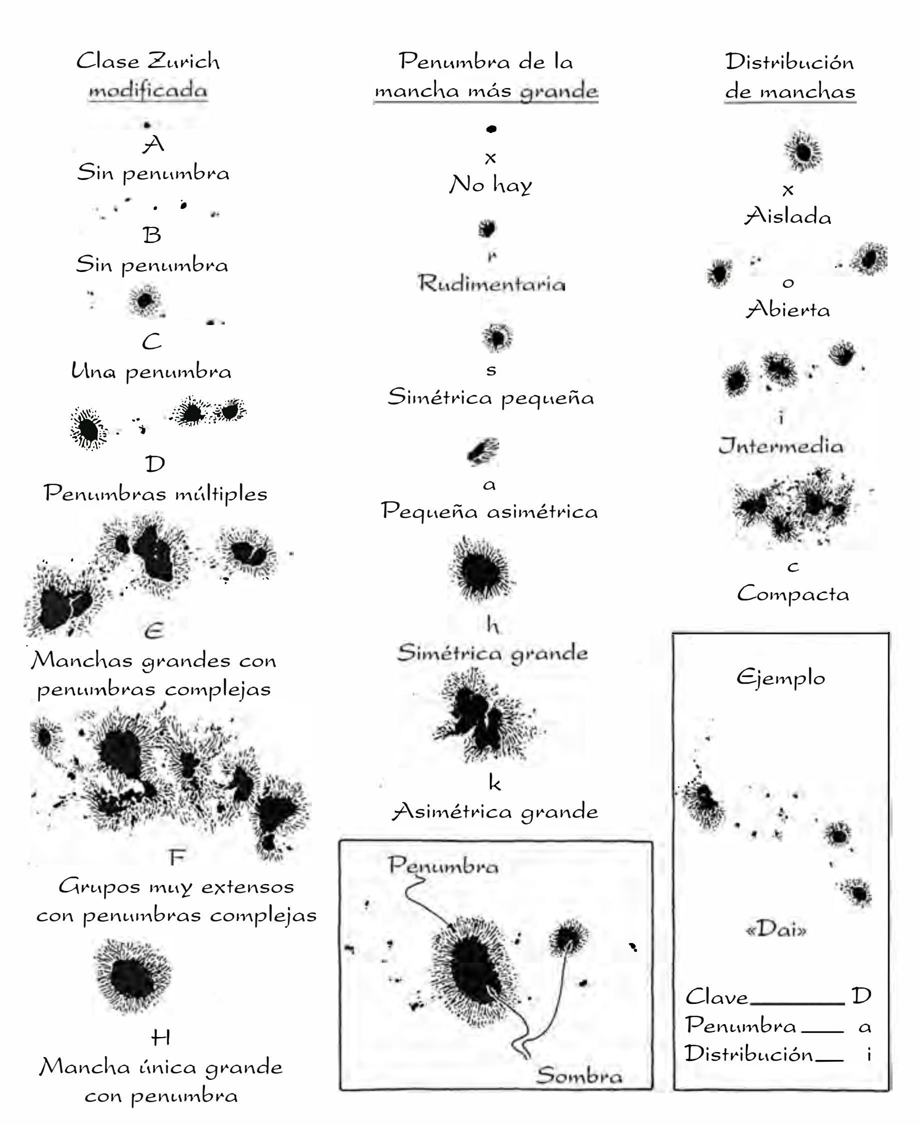
Para registrar con precisión el movimiento de las manchas solares, hay que repetir las observaciones a la misma hora del día. Con ello nos aseguraremos de que el Sol presenta la misma orientación cada vez. Si nuestras ocupaciones cotidianas no nos dejan atenernos a este plan, centraremos el sistema y lo observaremos durante algunos minutos mientras la imagen del Sol se desplaza por el diagrama. Y, en caso necesario, se girará la tablilla o todo el observatorio de modo que una de las manchas se mueva a lo largo o paralelamente a una línea del retículo trazado con anterioridad.

Con el tiempo se puede llegar a localizar el polo norte aproximado en el disco solar. Para el mediodía local aparente del hemisferio septentrional, el norte celeste se encuentra en el vértice superior del Sol. El polo norte real se encontrará todo lo más a 26 grados del norte celeste. Si el telescopio presenta en el ocular la imagen invertida, el vértice superior de la imagen que proyecta el Sol al mediodía es el norte. Si no, el vértice superior de la imagen proyectada será el sur.

Con un sistema así, Vicki realizó durante cuatro meses observaciones casi diarias de manchas solares. Midió la rotación del Sol siguiendo el movimiento completo de varias manchas y grupos de manchas en una travesía completa del disco solar. Pudo observar que algunas manchas se desplazaban más veloces que otras, diferencia que se debe al fenómeno según el cual los gases que se hallan en el ecuador solar rotan más deprisa que los más cercanos a los polos.

Cuando se observen manchas solares con este método de proyección, de vez en cuando conviene mover el papel adelante y atrás. Así se eliminan los efectos de la textura superficial del papel y pueden ponerse de manifiesto detalles que podrían perderse. Aunque las imágenes pueden registrarse con ayuda de una cámara o una grabadora de vídeo, muchos aficionados prefieren, como Vicki, marcar las manchas con un lápiz. Dejaremos, de ese modo, constancia de manchas pequeñas que una película o una cinta de vídeo quizá no capten. Ahora bien, a menos que dispongamos de un telescopio de guía automática, hay que trabajar rápido. Si las manchas son numerosas, habrá que realinear periódicamente el telescopio para asegurar que el disco solar permanezca sobre el contorno trazado en el papel.

Los observadores más concienzudos acaso prefieran seguir las evoluciones del Sol con un telescopio astronómico que permita lo mismo su proyección que su observación directa. Los instrumentos de observación directa suelen estar equipados con filtros de abertura (no oculares) hechos de película metálica. Un instrumento de mediana calidad revelará que la porción oscura central, o sombra, de algunas manchas solares está rodeada de una zona menos oscura, la penumbra. Podríamos asimismo llegar a clasificar las manchas y los grupos de manchas en función de su tamaño y aspecto. En la figura 4 se presenta uno de los sistemas de clasificación.



4. Sistema McIntosh de clasificación de grupos de manchas solares.

En las referencias se encontrará información y normas de seguridad adicionales.

Se decida o no el lector a seguir un programa regular para observar las manchas solares, podrá encontrar otros procedimientos para estar al corriente de las últimas novedades acerca del Sol. La estación de radio WWV emite a los 18 minutos después de cada hora un breve resumen de la situación que atraviesa el Sol y la actividad geofísica consiguiente. Este mensaje se actualiza cada tres horas. La WWV puede recibirse en un receptor de onda corta en las frecuencias de 2,5, 5, 10, 15 y 20 MHz. Como esa estación emite continuamente señales horarias de precisión, podemos poner en hora nuestros relojes mientras esperamos las últimas novedades acerca de la actividad solar.

El Space Environment Services Center, en Boulder, ofrece en plan experimental su Public Bulletin Board System (PBBS), preparado para transmitir información y predicciones actualizadas acerca de la actividad solar a los ordenadores personales equipados con modem. Al PBBS se accede marcando el (303) 495-5000. (Para acceder al sistema, el lector debe saber que el protocolo es una palabra de ocho bits y un espacio de un bit, y sin paridad en 300 ni en 1200 baudios.)

Otro procedimiento excelente para mantenerse al día con lo que ocurre en el Sol es suscribirse a la revista *Preliminary Report and Forecast of Solar-Geophysical Activity*. Se trata de un semanario que ofrece las novedades más importantes sobre la actividad solar y geomagnética y predice la actividad para los 27 días siguientes. En ella se informa del número oficial de manchas solares y se da una lista completa de las erupciones de rayos X y ópticas. De interés especial resultan las gráficas en que se compara el ciclo solar actual con ciclos anteriores.

Para suscribirse, remítase la solicitud a Space Environment Services Center, NOAA R/E/SE2, 325 Broadway, Boulder, Colorado 80303-3328.

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

A COMPLETE MANUAL OF AMATEUR ASTRONOMY. P. Clay Sherrod y Thomas L. Koed. Prentice Hall, 1981.

OBSERVATIONAL ASTRONOMY FOR AMATEURS. J. B. Sidgwick. Dover Publications, Inc., 1981.

THE SUN. Iain Nicolson. Rand McNally and Co., 1982.

WATCHING THE PREMIER STAR. Patrick S. McIntosh y Harold Leinbach en *Sky & Telescope*, vol. 76, n.º 5, págs. 468-471; noviembre de 1988.

Juegos matemáticos

Matemáticas de la escala musical

Ian Stewart

"¡Bendito sea el silencio!", dijo Oliver Gurney. —"¡Oliver, no seas aguafiestas!", le cortó Deirdre, la llama que por entonces encendía su corazón. "A *mí* me ha parecido que *Desplumar el faisán* es una canción francamente buena."

—"No me sorprende", rezongó Oliver con sarcasmo. "Pero no va con el ambiente de *El lirón en conserva*. Ya sabía yo que el nuevo patrón iba a fastidiarnos."

Oliver Gurney es individuo excéntrico y tajante, que se dedica a inventar chismes, en su mayoría, de efectos catastróficos. *El lirón en conserva* es un pub sumamente antiguo, sito al este de Manchester; el local, desde el exterior, parece un bloque de piedra gris; el escudo de la casa hace pensar, sin remedio, en un cerdo con abrigo de piel. Oliver lo descubrió hace siete años, mientras se ocupaba en inventar una bacteria que convirtiese petróleo en melaza; desde entonces actúa como si él fuese el dueño. En el interior, venerables moradores del Lancaster se dedican seis días por semana a cruzarse miradas levemente beodas sobre el borde de sus jarras de cerveza y a jugarse medios peniques a los dados, como han venido haciendo desde tiempo inmemorial. Pero desde la llegada del nuevo propietario, la noche del viernes es de velada musical, y un puñado de mozos y mozas locales cantan y tocan la guitarra durante algunas horas.

"Sea como fuere", prosiguió Oliver, "ese guitarrista no hace más que trabucarse los dedos".

—"Sólo le ocurrió una vez", tercié yo. "Tiene los dedos bastante gruesos, y eso le causa dificultades en las notas altas, donde los trastes se juntan."

—"Pues que se compre una guitarra con los trastes más separados."

—"No creo que eso sirviera de nada", dijo Deirdre.

—"No, desde luego", confirmé yo. "Hay muy buenas razones para que los trastes estén separados como lo están."

—"Me imagino que será para que las notas tengan el sonido debido", dijo Deirdre, y yo asentí con el gesto. "Pero no entiendo por qué la separación ha de ser cada vez menor al hacerse las notas más agudas", añadió.

—"Física elemental de las cuerdas vibrantes", dijo Oliver, petulante. Al mismo tiempo yo decía "Matemática". Probablemente con la misma fatuidad que Oliver; siendo mal juez de mis defectos, no lo puedo asegurar de cierto.

—"No me interesan gran cosa ni las matemáticas ni la física", dijo Deirdre. "Son demasiado impersonales. Prefiero cosas humanas, como la historia y las artes."

—"Lo que me fascina de la música", apostillé, "es que en ella se combina todo: ciencia, artes, cultura, historia... De hecho, la música es una de las ciencias más antiguas. Fue la música lo que llevó a los pitagóricos a la creencia de que el universo es un lugar armonioso regido por números".

—"¿La música... una ciencia?", dijo Deirdre, asombrada.

También Oliver alzó una mirada inquisitiva. A Oliver le encanta todo lo científico, pero su formación adolece de enormes lagunas. Así que, a lo largo de la hora siguiente, les ofrecí una visita guiada a la música en tanto que actividad matemática.

La música occidental de nuestros días se basa en una escala de notas, desde *Do* a *Si*, juntamente con los símbolos # (sostenido) y ^{b} (bemol). A partir de *Do*, por ejemplo, las notas sucesivas son:

Do Do# Re^{b} Re# Re Mi^{b} Mi Fa Fa# Sol^{b} Sol Sol# La^{b} La La# Si^{b} Si

repitiéndose después toda la serie a partir de *Do*, pero una octava más alta. En el piano, las teclas blancas corresponden a la escala natural *Do*, *Re*, *Mi*, *Fa*, *Sol*, *La*, *Si*, mientras que las teclas negras corresponden a los sostenidos y bemoles. Se trata de un sistema harto curioso: algunas notas parecen tener dos nombres, mientras otras, como *Si#*, no están representadas en el teclado. Como es obvio, esto no es todo, y las apariencias son bastante engañosas.

El sistema actual ha resultado de una evolución muy larga, y es una transacción entre exigencias en conflicto, todas las cuales se remontan a la tradición pitagórica de la antigua Grecia. Al dar ejemplos me valdré por comodidad de la notación moderna, aunque los puristas tendrían razón al objetar que estoy confundiendo nociones ligeramente diferentes.

Claudio Ptolomeo, que floreció hacia 150 después de Cristo, en Alejandría, es conocido sobre todo por sus trabajos astronómicos y geográficos; pero fue también autor de un libro de teoría musical, titulado *Armonía*. En él, Ptolomeo informa de la pretensión pitagórica de que los intervalos entre notas musicales pueden ser representados mediante razones de números enteros. Los pitagóricos demostraron que así era mediante un artilugio bastante burdo conocido por canon o monocordio [*véase la figura 1a*], una especie de guitarra con una sola cuerda.

Al desplazar el puente móvil a lo largo de un monocordio, ciertas posiciones parecen producir notas que, comparadas con la nota emitida por una cuerda entera, resultan más armoniosas que otras. El más básico de tales intervalos es la *octava*; en un piano, corresponde a un salto de ocho notas blancas. En un monocordio, es el intervalo que media entre la nota emitida por una cuerda entera [*figura 1a*] y la emitida por una de longitud exactamente mitad [*figura 1b*]. Así, pues, la razón de la longitud de cuerda que produce una nota dada a la longitud que produce su octava es 2/1, sea cual sea la longitud inicial. También otras razones de números enteros producen intervalos armoniosos. Las principales son la cuarta, que corresponde a una razón de 4/3 [*figura 1c*], y la quinta, una razón de 3/2 [*figura 1d*]. Partiendo de una nota base de *Do*, éstas son:

Do	*Re*	*Mi*	*Fa*	*Sol*	*La*	*Si*	*Do*
base			cuarta	quinta			octava

El lector seguramente reconocerá el origen de los nombres. Otros intervalos se construyen combinando estos bloques constructivos.

Se cree que, al objeto de crear una escala armoniosa, los pitagóricos partían de una nota base y ascendían en

quintas. Se obtiene así una serie de notas emitidas por cuerdas cuyas longitudes tienen las razones:

$$1;\ (3/2);\ (3/2)^2;\ (3/2)^3;\ (3/2)^4;\ (3/2)^5,$$

o sea,

$$1;\ 3/2;\ 9/4;\ 27/8;\ 81/16;\ 243/32.$$

La mayor parte de estas notas se salen de una única octava; es decir, las razones son mayores que 2/1. Pero podemos descender desde ellas en octavas (dividiendo sucesivamente por 2) hasta que las razones caigan entre 1/1 y 2/1. Entonces reordenamos las razones en orden numérico, obteniendo:

$$1;\ 9/8;\ 81/64;\ 3/2;\ 27/16;\ 243/128.$$

En el piano, estas relaciones corresponden aproximadamente a las notas

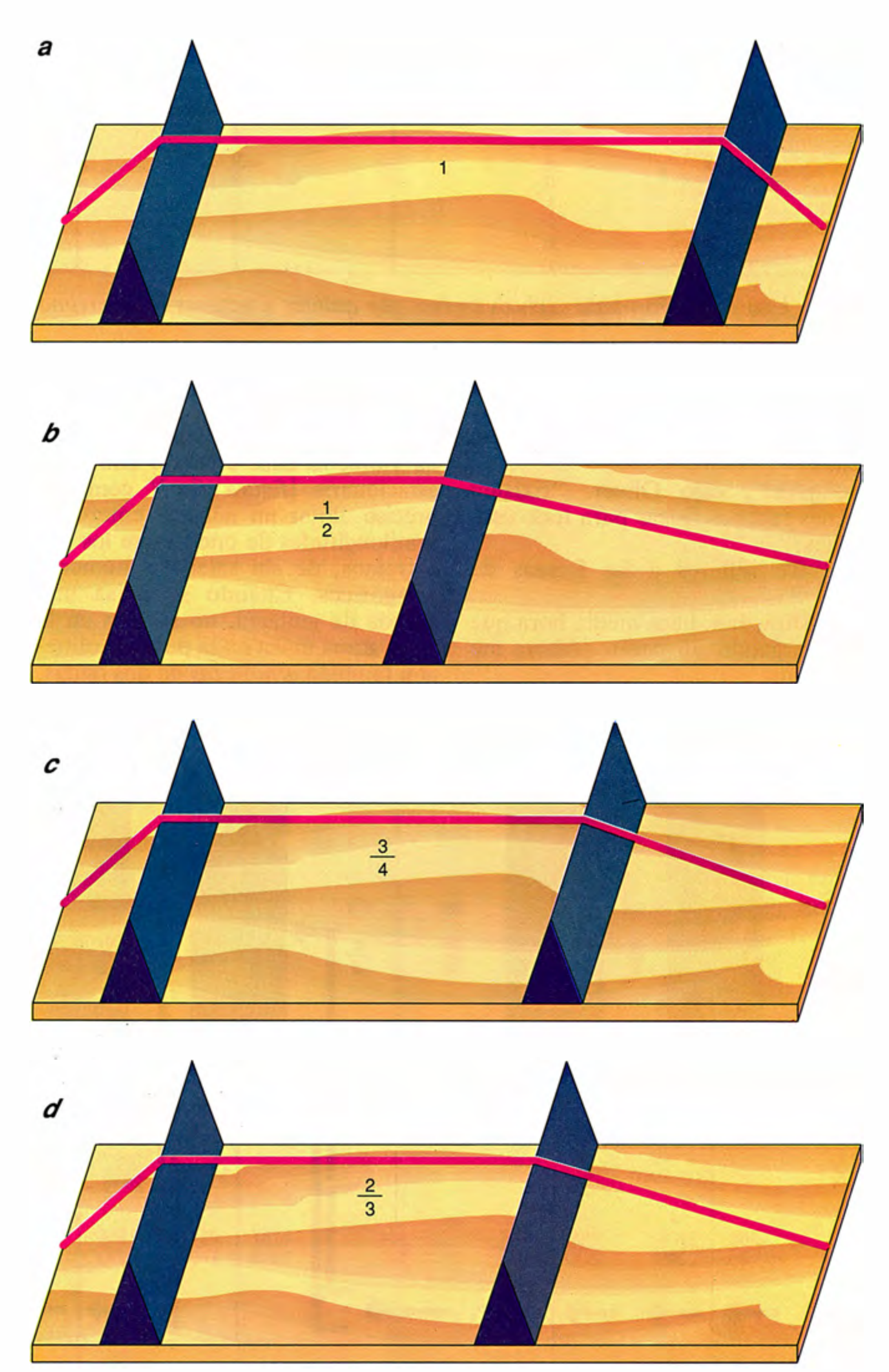
Do Re Mi Sol La Si,

y como la notación sugiere, ¡falta algo! El hiato entre 81/64 y 3/2 suena más "amplio" que los otros. Podemos taponar limpiamente el hueco insertando la cuarta, una razón de 4/3, que en el piano corresponde a *Fa*. De hecho, podríamos haber incorporado esta nota desde el principio si hubiésemos *descendido* desde la nota base mediante una quinta, añadiendo la razón 2/3 al frente de la secuencia y hubiéramos ascendido después en una octava, obteniendo $2 \times (2/3) = (4/3)$.

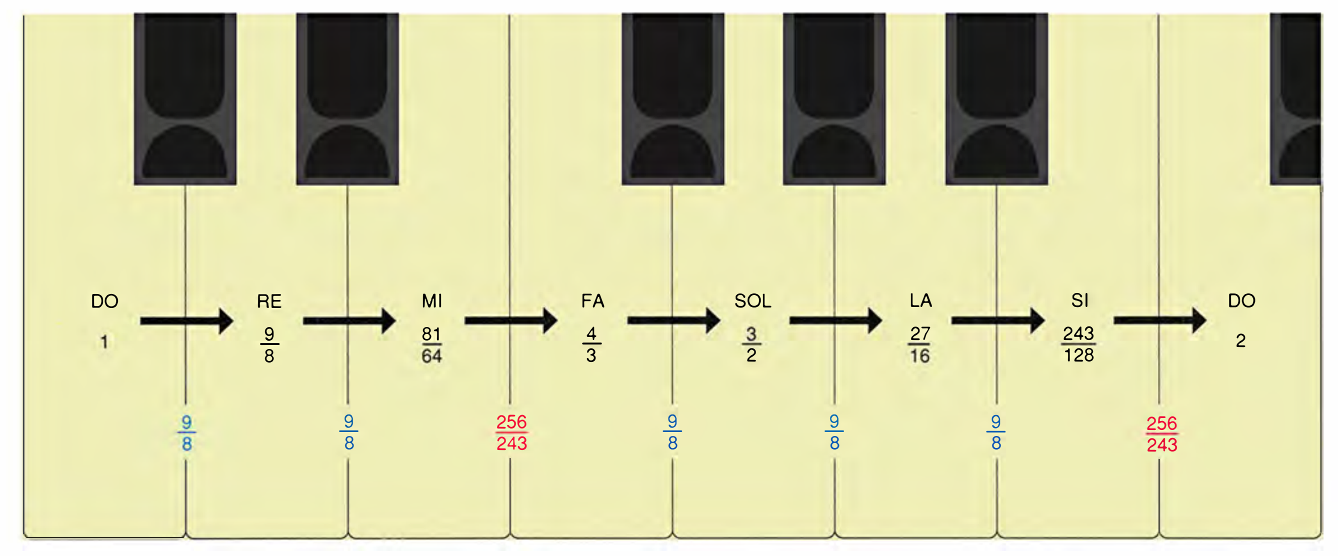
La escala así obtenida corresponde aproximadamente a las notas blancas del piano, como podemos ver en la figura 2. La última línea muestra los intervalos entre notas sucesivas, expresados también mediante razones. Existen exactamente dos razones diferentes: el *tono* 9/8 y el *semitono* 256/243.

En este punto es donde intervienen las notas negras del piano, los sostenidos y los bemoles. Un intervalo de dos semitonos es $(256/243)^2$, o sea, 65536/59049, aproximadamente igual a 1,11. Un tono es una razón de 9/8 = 1,125. Estos valores no son del todo iguales; no obstante, da la impresión de que dos semitonos hacen un tono. Lo cual significa que hay huecos en la escala: cada intervalo de un tono ha de ser dividido en dos intervalos, cada uno de los cuales ha de aproximarse lo más posible a un semitono.

Hay varios sistemas para ello. La llamada *escala cromática* parte de las fracciones $(3/2)^n$, para $n = -6, -5, \ldots, 5, 6$. Las reduce a la misma escala multiplicándolas o dividiéndolas repetidamente por dos, y después las coloca en orden. El resultado se muestra en la figura 3. Cada sostenido guarda la razón 2187/2048 (1,0679) con respecto a la nota inmediatamente inferior, de la cual toma el nombre; cada bemol tiene la relación 2048/2187 (0,93644) con relación a la nota superior. Hay un ligero fallo en el medio: dos notas, *Fa#* y *Sol*^{b}, están tratando de ocupar la misma casilla, aunque se diferencian muy ligeramente una de otra. Existen otros muchos sistemas que conducen también a distinciones entre sostenidos y bemoles, pero todos desembocan en



1. El monocordio, antiguo montaje experimental utilizado por los griegos para estudiar las armonías musicales. La cuerda completa emite la nota fundamental (a). *Cuando la cuerda tiene longitud 1/2 (razón 2/1), suena una octava más alta que la nota fundamental* (b). *Si su longitud es 3/4 de la primitiva (razón 4/3), la cuerda emite la cuarta de la nota base* (c), *y, si es 2/3 (razón 3/2), la nota que suena es la quinta* (d).



2. Una escala formada exclusivamente por quintas y octavas se aproxima a la de las teclas blancas del piano.

una escala de 12 notas que se aproxima mucho a la compuesta por las notas blancas más las notas negras del piano.

—"¡Ah!", dijo Oliver. "Existen buenas razones físicas para todo eso, ¿sabes?".

—"¿Te refieres a las formas de onda..."

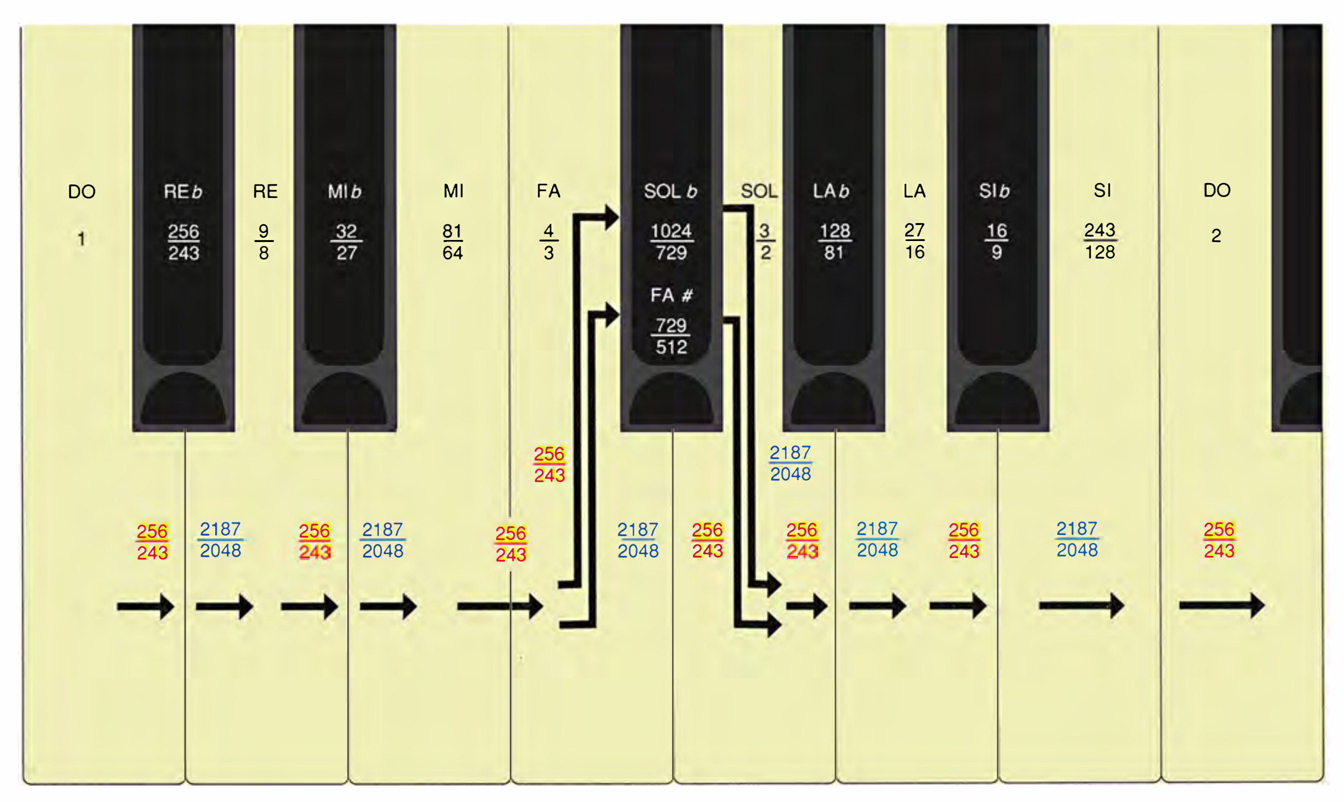
—"Mira, Ian, hace media hora que estás largando sin parar. ¡Ahora me toca a mí!".

Me disculpé y Oliver retomó la historia.

"Verás, Deirdre, cuando una cuerda vibra, lo hace creando una onda estacionaria [*figura 4*]. Y como es preciso alojar un número entero de semilongitudes de onda entre los dos extremos, de ahí salen los números pitagóricos. Cuando se pulsa una cuerda de guitarra, no se crea en la cuerda una única onda pura; se obtienen también *armónicas* de dos ondas, tres, cuatro, y así sucesivamente. Al combinarse todas producen un sonido más rico.

"Ahora, si se combinan dos ondas de longitudes ligeramente distintas se obtienen *batidos* en los puntos de refuerzo [*figura 5*]. Estos batidos suenan bastante desagradables al oído."

"Yo creo que eso tiene que ver con la respuesta no lineal del tímpano", logré colar. "Existen probablemente razones fisiológicas..."



3. La escala cromática de doce notas da cabida también a las notas de las teclas negras (los sostenidos # y bemoles ^{b}*). Dos notas,* Fa# *y* Sol^b *resultan ligeramente diferentes, a pesar de que deberían ser iguales.*

"Lo mismo ocurre si hay batidos entre los *armónicos* de las notas. La forma más sencilla de evitarlo es utilizar notas cuyas longitudes de onda estén relacionadas por razones numéricas sencillas, como 3/2 o 4/3, pongamos por caso. También es de ahí de donde proceden las razones pitagóricas."

"Lo que dices parece lógico", señaló Deirdre.

"Sí", dije yo, "pero sigo pensando que hay que considerar las causas fisio..."

"Hermann von Helmoltz puso concienzudamente a prueba esta teoría en 1877", recordó Oliver, pegándome un puntapié por debajo de la mesa. "Helmholtz estudió los batidos entre armónicos, y los utilizó para predecir cuánto habría de variar el grado de disonancia entre dos notas con la razón entre ellas. Sus resultados concuerdan muy bien con estimaciones psicológicas efectuadas por voluntarios humanos [*figura 6*]."

"Ya dije que es preciso tener en cuenta la forma en que un oído humano real..."

"Por favor, Oliver, me gustaría tomar otro vaso de vino", cortó Deirdre diplomáticamente, y le envió a buscarlo mientras todavía me quedaba algo de espinilla sana. Eso me dio tiempo a retomar mi historia.

Como le expliqué a Deirdre, la razón del fallo de la escala cromática, y la razón de que existan tantos sistemas diferentes de construcción de escalas, es que no es posible basar una escala "perfecta" de 12 notas basándose en las razones pitagóricas de 3/2 y 4/3. Entiendo por escala perfecta una escala en la que las razones sean

$$1\ r\ r^2\ r^3\ r^4 \dots r^{12} = 2$$

para un número fijo r. En las razones pitagóricas solamente intervienen los números primos 2 y 3: cada razón es de la forma 2^a3^b para diversos enteros a y b. Por ejemplo, $243/128 = 2^{-7}3^5$. Supongamos que $r = 2^a3^b$ y que $r^{12} = 2$. Entonces $2^{12a}3^{12b} = 2$, con lo que $2^{12a-1} = 3^{-12b}$. Pero una potencia entera de 2 no puede ser igual a una potencia entera de 3, por la unicidad de la descomposición en números primos.

¿Cambiaría en algo el razonamiento anterior si el número de notas de la escala fuese distinto de 12? ¿Y si permitiéramos que en las razones apareciesen otros números primos?

Esto pone punto final a una escala musical basada en principios pitagóricos de armonía de números enteros, pero no significa que no podamos hallar un número r adecuado. La ecuación $r^{12} = 2$ tiene una solución, a saber,

$$r = \sqrt[12]{2} = 1{,}059463494\dots$$

La escala resultante se llama *equitemperada*, con muchas ventajas. Si se empieza a tocar una escala pitagórica por alguna nota intermedia —una trasposición de *clave*—, la secuencia de intervalos cambia ligeramente. Las escalas equitemperadas no sufren este problema, por lo que resultan útiles si se desea tocar el mismo instrumento en diferentes claves. Los instrumentos musicales que han de tocar intervalos fijos, como los pianos y las guitarras, utilizan por lo general la escala equitemperada. El intervalo semitonal pitagórico es 256/243 = 1,05349... y está cercano a $\sqrt[12]{2}$, por lo que también se utiliza el nombre "semitono" para el intervalo básico de la escala equitemperada.

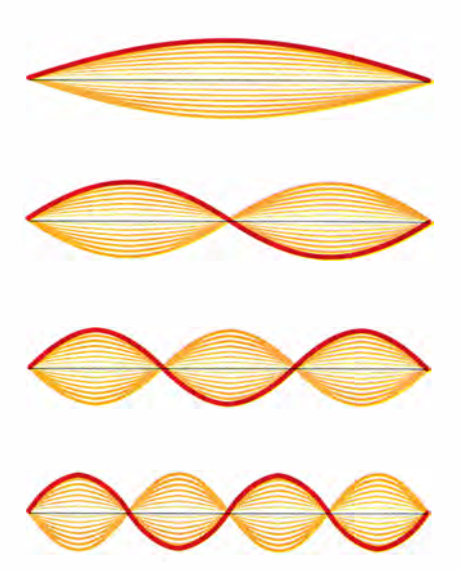
Deirdre estuvo reflexionando en esto un momento. "Dijiste antes que, para cuerdas vibrantes, el intervalo musical está dado por la razón de las longitudes. ¿Y qué relación hay con las posiciones de los trastes en una guitarra?"

"Bueno", respondí, "pensemos en el primer traste del mástil, que corresponde a un aumento de altura de un semitono. La longitud de cuerda libre de vibrar ha de ser $1/r$ de la longitud de la cuerda entera. Así, pues, la distancia al primer traste es $1 - 1/r$ veces la longitud de la cuerda entera. Para calcular la distancia siguiente, basta observar que todo se ha contraído en un factor r, por lo que los espacios entre trastes sucesivos se encuentran en las proporciones

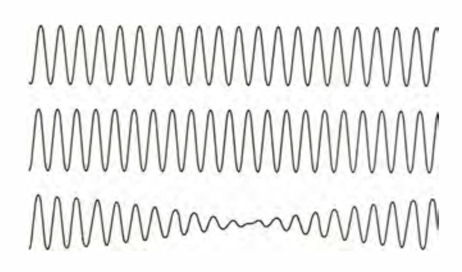
$$1\ 1/r\ 1/r^2\ 1/r^3$$

y así sucesivamente. Ahora, r es mayor que 1, por lo que $1/r$ es menor que 1, y eso significa que las distancias entre trastes sucesivos son cada vez *menores* [*figura 7*]".

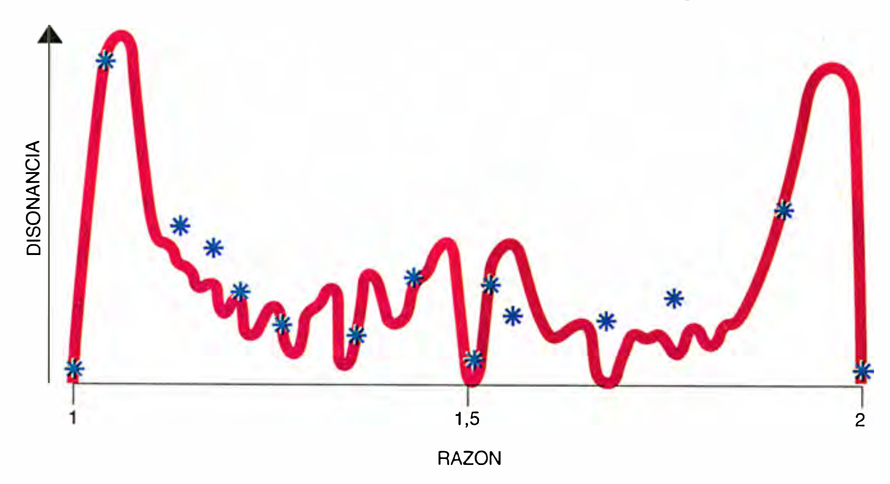
Oliver regresó con una copa de vino blanco seco, más dos pintas de cerveza y tres bolsas de cortezas fritas de tocino y cebolla, que a él le encan-



4. Las vibraciones de una cuerda engendran ondas sinusoidales estacionarias, cuya semilongitud de onda ha ser divisor de la longitud de la cuerda.



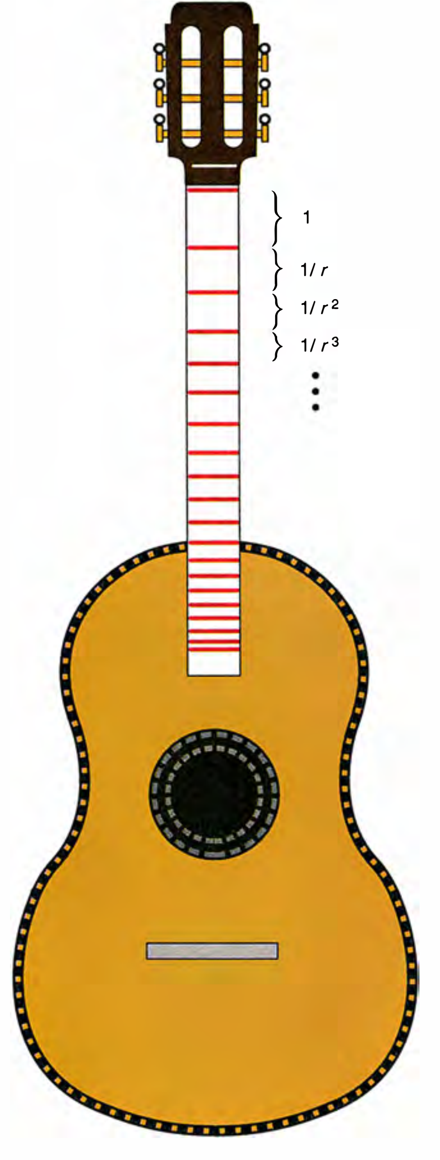
5. La combinación de ondas de longitud ligeramente distinta provoca batidos desagradables al oído.



6. La curva teórica de disonancia en función del intervalo musical, debida a Helmholtz (curva continua), *y valores experimentales de la disonancia según oyentes humanos* (asteriscos azules)

tan, y que Deirdre y yo detestamos. Las compra siempre, porque así puede él comérselas todas. Para entonces había recuperado su habitual jovialidad, y se lanzó a una animada explicación de lo embarazoso que debió resultarles a los pitagóricos el descubrimiento de que sus hermosos esquemas numéricos padecían deficiencias en la práctica.

Le hice notar que cuando los griegos tenían que habérselas con números irracionales, como $\sqrt[12]{2}$, no expresables mediante fracciones exactas, solían recurrir a la geometría. Según la tradición, la geometría griega hacía considerable hincapié en las longitudes constructibles utilizando solamente regla y compás. Se pueden construir así, por ejemplo, los cuadrados y las raíces cuadradas [*figura 8*]. El clásico problema de "duplicación del cubo" pide tal construcción para $\sqrt[3]{2}$. Sabemos hoy que esa construcción no es posible. (Sospechamos también que el empeño en lograr construcciones por regla y compás era menos intenso de lo que muchos libros de historia proclaman; pero esa es harina de otro costal.) En cualquier caso, podemos deducir que no existe tampoco una construcción con regla y compás para $\sqrt[12]{2}$. (¿Por qué?)



7. La separación de los trastes de la guitarra disminuye hacia las notas altas.

"Sí, pero tú has dicho que la escala equitemperada es un compromiso, una aproximación", atajó Deirdre. "Y la cuarta verdadera, a un intervalo de 4/3, sí suena en realidad más armoniosamente que la cuarta equitemperada. Los cantantes, por ejemplo, la encuentran más natural."

Se produjo un silencio estupefacto. "O sea, que tú ya sabías todo esto", logré articular yo.

"Sí. Estudié teoría musical en el conservatorio. Pero lo estabas explicando tan bien que me dio pena interrumpir."

Oliver se echó a reír, pero un segundo más tarde hacía chitón al darse cuenta de que seguramente Deirdre sabría también lo de von Helmholtz. Fue ella quien tomó ahora el hilo de la conversación. "Lo que yo quería decir es que, puesto que la escala equitemperada no es más que una solución de compromiso, ¿no existirá alguna construcción geométrica *aproximada* que nos diga dónde situar los trastes de la guitarra?"

Eso me puso en marcha otra vez. "Pues verás, no solamente existe tal construcción aproximada, sino que tiene una historia curiosa de verdad. La historia es ilustración de la profunda elegancia de las matemáticas, pero su moraleja enseña humildad, pues es el cuento del sobresaliente triunfo de un hombre práctico que fue anulado por el descuido de un matemático profesional."

"¡Oooh! ¡Fantástico!", dijo Deirdre, mientras a Oliver se le iluminaban los ojos —aunque bien pudiera ser por culpa de la cerveza. "Cuéntanoslo, por favor."

En los siglos XVI y XVII, la determinación de métodos geométricos para ubicar los trastes en los instrumentos musicales —el lute y la viola, más que la guitarra— era un problema práctico serio cuya solución guardaban celosamente los artesanos. En 1581, Vincenzo Galilei, padre del gran Galileo Galilei, abogaba por un semitono dado por:

$$18/17 = 1{,}05882\ldots$$

que daba pie a un método perfectamente práctico, que fue de uso común durante varios siglos. En 1636, Marin Mersenne, un sacerdote famoso sobre todo por sus números primos de la forma 2^n-1, aproximó un intervalo de cuatro semitonos mediante la razón $2/(3-\sqrt{2})$. Tomando dos raíces cuadradas por dos veces, pudo obtener una mejor aproximación del intervalo correspondiente a un semitono:

$$\sqrt{\sqrt{(2/(3-\sqrt{2}))}} = 1{,}05973\ldots$$

valor que se aproxima lo suficiente para los fines prácticos. La fórmula solamente utiliza raíces cuadradas y puede, por tanto, construirse geométricamente. No obstante, resulta difícil llevar esta construcción a la práctica, porque los errores tienden a acumularse. Se requería un método más exacto que la aproximación de Galileo, pero más fácil de utilizar que la de Mersenne.

En 1743, Daniel Strähle, un artesano sin formación matemática, publicó un artículo en los *Anales de la Academia Sueca*, presentando una construcción sencilla y práctica [*figura 9*]. Quizás el lector guste de realizarla y comparar los resultados con los de un instrumento musical real. Pero, ¿cuál es su precisión? El geométra y economista Jacob Faggot efectuó un cálculo trigonométrico para averiguarlo, cálculo que añadió al artículo de Strähle, y concluyó que el error máximo era del 1,7 por ciento. Este error era unas cinco veces mayor de lo que un músico consideraría aceptable.

Faggot era miembro fundador de la Academia Sueca, actuó durante tres años de secretario de la misma y publicó dieciocho artículos en sus *Anales*. En 1776, ocupaba el cuarto puesto en el escalafón de la Academia: Carl Linnaeus, el botánico que estableció los principios básicos de clasificación de animales y plantas en clases y géneros, figuraba entonces un poco por delante de él. Así que, cuando Faggot declaró que el método de Strähle era insuficientemente exacto, la cosa quedó zanjada. Por ejemplo, el *Treatise on Musical Temperament* de F. W. Marpurg (1776) cita la conclusión de Faggot sin describir el método de Strähle.

Ese estado de cosas persistió hasta 1957, año en que J. M. Barbour, de la Universidad estatal de Michigan, descubrió que Faggot había cometido un error.

Faggot empezó hallando el ángulo de la base OQR del triángulo grande, que es de 75°31′. A partir de él pudo hallar la longitud RP y el ángulo de la

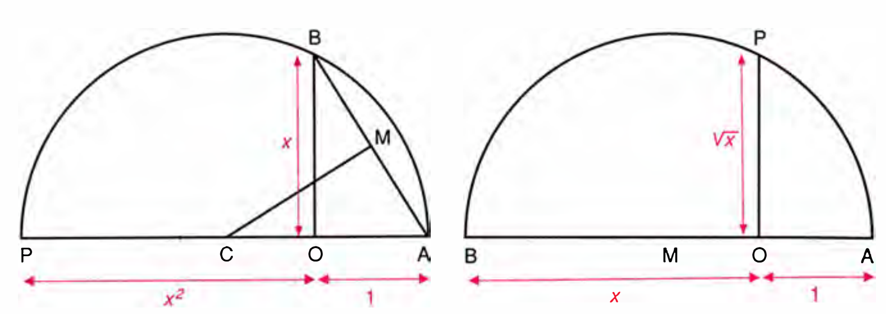
base del triángulo *PRQ*. Cada uno de los once ángulos formados en lo alto del triángulo principal por los rayos que llevan a la base podían calcularse sin dificultad; era entonces cosa sencilla hallar las longitudes determinadas a lo largo de la recta *RPM*.

Sin embargo, Faggot había calculado en 40°14′ el valor del ángulo *PRQ*, cuando en realidad es de 33°32′. Este error, como dice Barbour, "era fatal, dado que *PRQ* se utilizaba para resolver cada uno de los demás triángulos, ejerciendo así su perniciosa influencia sobre todos ellos". El error equivalía a hacer *PQ* igual a 8,6 en lugar de a 7. Con el valor correcto, el error máximo se reduce de 1,7% a 0,15%, que es perfectamente aceptable.

Hasta ahora, la historia deja en bastante mal lugar a los matemáticos. ¡Si por lo menos Faggot se hubiera molestado en medir *PRQ*! Pero Barbour fue más lejos, preguntándose *por qué* era tan exacto el método de Strähle; y lo que descubrió es una preciosa ilustración de la capacidad de las matemáticas para dejar al desnudo las razones subyacentes a las aparentes coincidencias. (He de añadir inmediatamente que no se está dando a entender que el propio Strähle hubiera seguido un razonamiento similar; por lo que sabemos, su método se fundaba en la intuición del artesano y no en principios específicamente matemáticos. ¡Como veremos, su intuición fue extremadamente atinada!)

Podemos representar en una gráfica la distancia del *n*-ésimo traste al punto *M* de la recta *MPR* [*figura 10*]. El eje de abscisas es la recta *QR*, con el punto *Q* en el origen y con *R* en el 1. Desplazamos *MPR* hasta convertirla en el eje de ordenadas de la gráfica, con *M* en el origen, *P* en 1, y *R* en 2. Los sucesivos trastes se encuentran a lo largo del eje y en los puntos $1, r, r^2, \ldots, r^{11}, r^{12} = 2$. (Fijémonos en que no se trata de las razones $1/r$, $1/r^2, \ldots$ anteriormente mencionadas, porque estamos trabajando desde el extremo opuesto de la cuerda.)

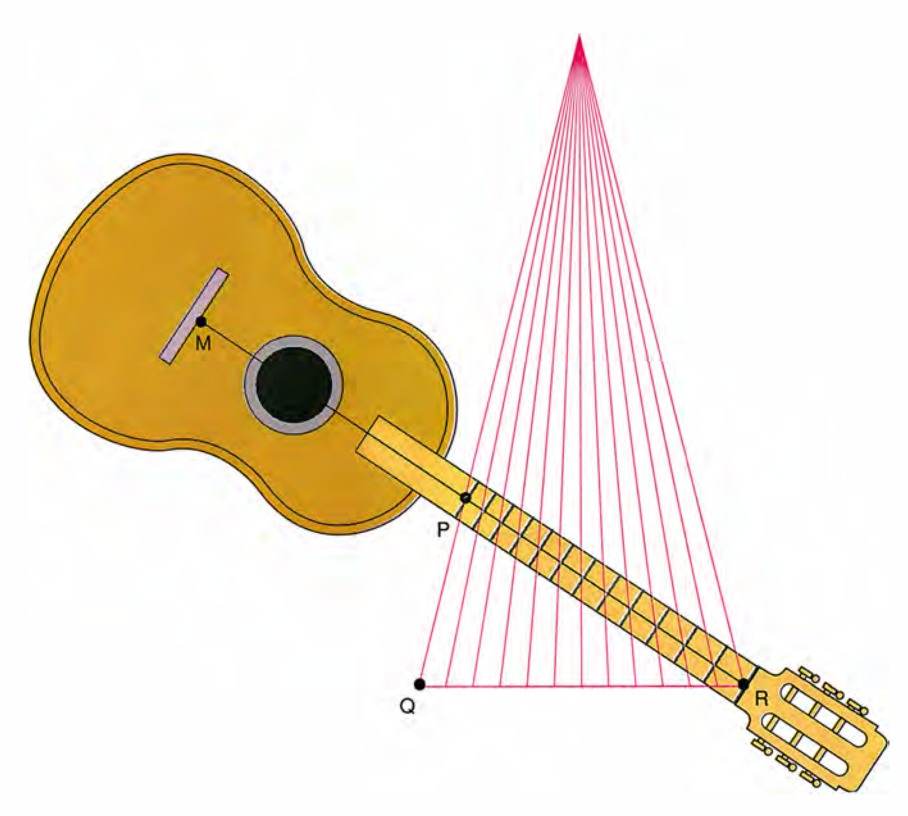
Los matemáticos dirían que la construcción de Strähle es una *proyección* de centro *O* desde un conjunto de puntos equidistantes situados sobre *QR* hasta los puntos deseados a lo largo de *MPR*. Es posible demostrar, mediante razonamientos geométricos sencillos, que tal proyección tiene siempre la forma algebraica $y = (ax + b)/(cx + d)$, donde *a*, *b*, *c* y *d* son constantes. Las funciones de esta clase se llaman funciones *homográficas*. Los coeficientes, en el método de Strähle, son $a = 10$, $b = 24$, $c = -7$, $d = 24$; la proyección lleva siempre un punto dado *x* de *QR* al punto $y = (10x + 24)/(-7x + 24)$ de *MPR*.



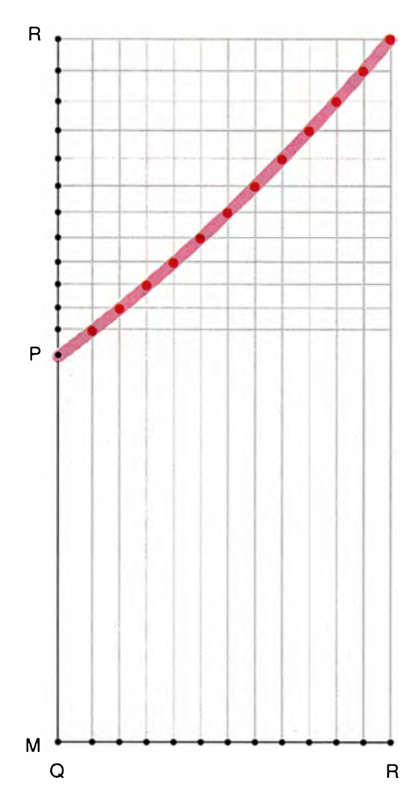
8. Construcciones del cuadrado y de la raíz cuadrada, dada una longitud unidad, del cuadrado (a): Se traza un triángulo rectángulo AOB, con OA = *1,* OB = x. *Se halla el punto medio M de AB y se traza la mediatriz MC, perpendicular a AB, hasta cortar a la prolongación de AO en C. Se traza por A una semicircunferencia de centro C, hasta cortar a la prolongación de AO en P. Ahora* OP *tiene longitud* x^2. De la raíz cuadrada (b): *Se traza el segmento AOB con* AO = *1,* OB = x. *Se halla el punto medio M de AB y se traza la semicircunferencia de centro M que pasa por B y por A. Se traza OP, perpendicular a AB, hasta cortar al semicírculo en P. Entonces OP tiene longitud* $\sqrt{x}$.

Si la construcción fuese exacta, tendríamos $y = 2^x$. De ser así, los trece puntos igualmente separados $x = n/12$ de *QR*, donde $n = 0, 1, 2, \ldots, 12$, quedarían transformados en los puntos $2^n/12 = (2^{1/12})^n = r^n$ de *MPR*, como se deseaba para igual y exacto temperamento.

Pero la construcción no es exacta, si bien los cálculos de Barbour muestran que es muy aproximada. ¿Por qué? La clave está en hallar la *aproximación óptima* de 2^x, válida en el in-



9. La construcción de Strähle. Se traza un segmento QR *de longitud 12 dividido en 12 intervalos iguales de longitud 1. Se halla* O, *tal que* OP = OQ = *24. Se une* O *a los puntos de división de* QR. *Se sitúa* P *sobre* OQ, *de suerte que* QP *mida 7 unidades. Se traza la recta* RP, *que es prolongada hasta* M *de modo que resulte* PM = RP. *Si* RM *corresponde al tono fundamental y* PM *es su octava, los puntos de intersección de* RP *con los 11 rayos sucesivos que parten de* O *corresponden a semitonos sucesivos dentro de la octava, esto es, a las posiciones intermedias de los 11 trastes que han de ir entre* R *y* PM.



10. Gráfico de la función asociada a la construcción de Strähle.

tervalo $0 \leq x \leq 1$, que sea de la forma $(ax + b)/(cx + d)$. Una forma de conseguirlo es hacer que ambas expresiones coincidan cuando $x = 0$, $^1/_2$ y 1 [*véase la figura 11*]. Al hacerlo se obtienen tres ecuaciones, con las que es preciso calcular a, b, c, d; a saber:

$$b/d = 1$$
$$(a/2 + b)/(c/2 + d) = \sqrt{2}$$
$$(a + b)/(c + d) = 2.$$

Parece a primera vista que para hallar cuatro incógnitas vamos a necesitar una ecuación más, pero en realidad solamente necesitamos las *razones* b/a, c/a y d/a, por lo que tres ecuaciones bastan.

Tras resolver el sistema, tomando el valor

$$a = 2 - \sqrt{2}$$

llegamos a:

$$b = \sqrt{2}$$
$$c = 1 - \sqrt{2}$$
$$d = \sqrt{2},$$

por lo que la mejor aproximación de 2^x mediante una función homográfica adopta la forma:

$$(1)\ y = [(2 - \sqrt{2})x + \sqrt{2})]/[(1 - \sqrt{2})x + \sqrt{2}].$$

"No se parece gran cosa a la función de Strähle", dijo Deirdre.

"No", concedí, "pero aún falta el último trabajo de filigrana".

"Se cambia $\sqrt{2}$ por alguna aproximación", propuso Oliver.

"No exactamente. Lo que hizo Barbour fue estimar el *error* en función de la aproximación de $\sqrt{2}$ por 58/41. E Isaac Schoenberg hizo otro tanto en su exposición del problema, en 1982. Veréis, si en (1) se sustituye $\sqrt{2}$ por 58/41, se obtiene la función $(24x + 58)/(-17x + 58)$, que es distinta de la de Strähle.

"Pero ahora que lo has mencionado, tal vez lo que dices sea lo más natural. Dudo que funcione, pero... veremos." Me hice con una servilleta, le pedí prestado un bolígrafo a Oliver, y comencé a echar mis cuentas. Los útiles del matemático son papel y lápiz; por eso, ningún matemático lleva jamás ni uno ni otro, y han indefectiblemente de pedir prestado el boli y escribir en una servilleta.

Empezó a hacerse la luz.

Existen diversas fracciones racionales que aproximan a $\sqrt{2}$. Una forma de obtenerlas consiste en partir de la ecuación $p/q = \sqrt{2}$ y elevar al cuadrado para obtener $p^2 = 2q^2$. Como $\sqrt{2}$ es irracional, es imposible hallar enteros p y q que verifiquen la ecuación anterior (más exactamente, debido a tal imposibilidad se dice que $\sqrt{2}$ es irracional). No obstante, podemos aproximarnos buscando enteros p y q tales que p^2 se halle cerca de $2q^2$. Las mejores aproximaciones son aquellas en las que el error es mínimo; esto es, son las soluciones de la ecuación $p^2 = 2q^2 \pm 1$. Por ejemplo, $3^2 = 2.2^2 + 1$, y $3/2 = 1{,}5$ se encuentra moderadamente cercano a $\sqrt{2}$. El caso siguiente es $7^2 = 2.5^2 - 1$, lo que nos lleva a $7/5 = 1{,}4$, todavía más cercano. Se puede proseguir indefinidamente, y existe una preciosa teoría que lleva a las fracciones continuas y la ecuación de Pell y cosas de ese jaez.

He aquí lo que habían revelado mis garrapatos. Dividamos por 2 el numerador y el denominador de la fórmula (1) y escribámosla en la forma equivalente:

$$(2)\ y = [x + (1 - x)/\sqrt{2}]/[x/2 + (1 - x)/\sqrt{2}].$$

Reemplacemos ahora $\sqrt{2}$ por la aproximación 17/12, con lo que $1/\sqrt{2}$ se convierte en 12/17.

Se obtiene así:

$$(3)\ y = [x + 12\ (1 - x)/17]/[x/2 + 12\ (1 - x)/17].$$

Finalmente, al simplificar esta fracción se obtiene $(10x + 24)/(-7x + 24)$, esto es, ¡justamente la fórmula de Strähle!

Así, pues, la construcción de Strähle es muy exacta, porque combina eficazmente *dos* buenas aproximaciones:

—La aproximación óptima de 2^x mediante funciones homográficas es la fórmula (1) anteriormente dada.

—La función de Strähle se obtiene de la fórmula (1) al reemplazar $\sqrt{2}$ por la excelente aproximación 17/12.

En la figura 12 se muestran los errores correspondientes a las diversas aproximaciones comentadas. ¡Los errores máximos son los de Faggot!

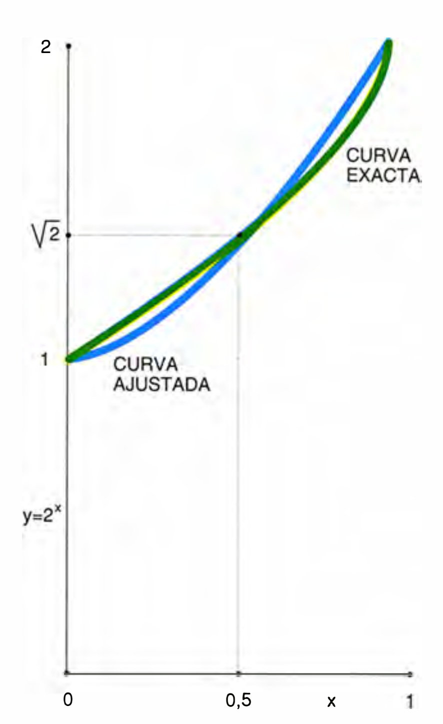
"Así, pues", concluí yo, "gracias al trabajo histórico-matemático-detectivesco de Barbour, no sólo sabemos hoy que el método de Strähle es extraordinariamente exacto, sino que tenemos una idea muy clara de por qué lo es. Tiene relación con ideas fundamentales de la teoría de aproximación y de la teoría de números".

Lo cual dejó sin respuesta sólo una pregunta, que me temo sea imposible de responder por siempre jamás. Fue planteada por Oliver Gurney tras haber digerido una hora de matemáticas amén de tres paquetes de fritos de tripa con cebolla y sendas jarras de cerveza.

"Es fascinante", declaró. "Absolutamente impresionante. El experto es confundido y el hombre práctico, vindicado al cabo de una bagatela, 218 años; prácticamente nada. Si llego a tropezarme con Strähle después de esta vida se lo contaré; estoy seguro de que le agradará ver limpio su nombre. Pero lo que de verdad me gustaría preguntarle es esto: *¿Cómo diablos se le ocurrió su construcción?*"

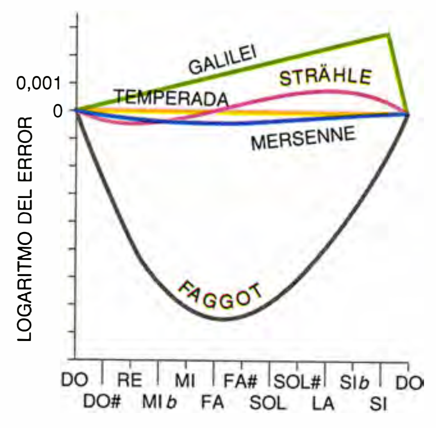
Respuestas

Ninguna escala de longitud finita, cuya razón entre notas consecutivas sea constante y racional, puede ascender una octava exacta, con la excepción trivial de una escala que suba en octavas. Evidentemente, la ecuación $r^n = 2$ no puede tener solución racional cuando n es un entero mayor o igual que 2. Para demostrarlo, supongamos lo contrario y descompongamos r en producto de números primos: $r = 2^a3^b...p^c$. Entonces, de $r^n = 2$ se sigue que $2^{na-1}3^{nb}...p^{nc} = 1$. Por la unicidad de la descomposición en factores primos, hemos de tener $b = 0,..., c = 0$. Pero también $na = 1$, por lo que $n = 1$, $a = 1$, y la escala ha de ascender en octavas.



11. Determinación de la función homográfica de ajuste óptimo que coincide con 2x en los puntos 0, 1/2, 1.

De existir una construcción de $\sqrt[12]{2}$ con regla y compás, elevando al cuadrado dos veces este número (mediante regla y compás, como en la figura 8) podríamos construir $\sqrt[3]{2}$, lo cual sabemos que es imposible. No puede, por tanto, existir una construcción de $\sqrt[12]{2}$ con regla y compás.



12. Errores de las diversas construcciones de la gama temperada. El valor del error se determina tomando el logaritmo de la razón del valor aproximado al auténtico. La escala equitemperada exacta está en negro, el método de Strähle en rojo, el método de Mersenne en azul, el método de Galilei en verde y los cálculos erróneos de Faggot en marrón.

Libros

Rey Pastor, embriología, conquista de la estratosfera y ciencia pregalileana

Albert Dou, Antonio Prevosti, Luis Ruiz de Gopegui y Luis Alonso

SELECTA, de Julio Rey Pastor. Prólogo: Angel Martín-Municio. Comentarios: Sixto Ríos, Luis Antonio Santaló, Ernesto García Camarero. Edición preparada por la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Madrid, 1988.

El centenario del nacimiento de Julio Rey Pastor, quien vio la luz en Logroño el 14 de agosto de 1888, es una ocasión obligada para honrar su memoria. La Real Academia de Ciencias de Madrid, a la que perteneció Rey Pastor desde 1920 hasta su muerte en 1962, acordó celebrar este centenario publicando una selección de algunos de sus trabajos más representativos, con el título *Selecta*.

La obra consta de 724 páginas y los trabajos de Rey Pastor que ofrece se clasifican en tres grupos, a cada uno de los cuales se dedica una parte de la obra. Cada una de las tres partes va precedida de una introducción a cargo de un discípulo del autor. Anteceden a estas tres partes una introducción general y un prólogo. El presidente de la Academia, Angel Martín-Municio, es el autor del prólogo y en él no se limita a una mera presentación del autor, sino que describe adecuadamente el marco científico y cultural en el que se mueve el matemático riojano. Señala su vocación primaria de matemático y establece la que constituye la tarea paralela de Rey Pastor, a saber la de contribuir con sus brillantes cualidades y extraordinaria energía a la promoción de la matemática en España y Argentina. A continuación, Sixto Ríos da una breve introducción general a los trabajos de Rey, en la que resume la increíble y eficaz actividad del autor.

Sixto Ríos es también el autor de la introducción o comentario a la primera parte de la obra, la más importante y extensa. Comprende los trabajos de análisis, álgebra y matemática aplicada, aunque comprensiblemente excluye de la selección los libros de carácter didáctico, que por cierto son numerosos y excelentes. El comentarista selecciona 23 trabajos de Rey. Con objeto de dar una buena idea panorámica de la obra del autor, Ríos clasifica estos trabajos en cinco sectores: a) representación conforme, b) sumación de series divergentes, c) singularidades de las funciones analíticas, d) álgebra clásica y análisis numérico, y e) matemática aplicada. Sobresalen los artículos dedicados a los tres primeros sectores y en particular la extensa monografía *Teoría de los algoritmos lineales de convergencia y sumación*. Diez de los artículos reproducidos en facsímil no pasan de cinco páginas y hay cuatro de seis páginas; entre estos últimos figura el bello y profundo artículo de Rey Pastor publicado en los *Rend. Circ. Mat. di Palermo* (1931). De los trabajos dedicados a la transformación conforme, el comentarista selecciona el ciclo de conferencias, redactadas por Esteban Terrades en catalán y publicadas por "l'Institut de Ciències" con el título *Teoria de la Representació conforme* (1915). La rica y competente introducción de Ríos, entre otros méritos, pone de manifiesto la interna ligazón de los trabajos de Rey, especialmente entre los tres primeros sectores mencionados; también hace patente la preocupación de Rey por la apertura de las matemáticas hacia la realidad física, preocupación que se prolonga hasta un interés permanente de Rey por problemas de análisis numérico.

La segunda parte de *Selecta* está dedicada a la obra de Rey Pastor en geometría y topología y se inicia con un comentario de Luis Antonio Santaló. La primera década de investigación matemática de Rey está dedicada a la geometría, hecho al que probablemente no fue ajena la competencia y enorme autoridad de Eduardo Torroja y Caballé. Santaló selecciona once publicaciones de Rey Pastor y da una idea muy precisa y profunda de su contenido y que resulta extraordinariamente laudatoria para Rey. Descuellan las dos extensas monografías *Teoría geométrica de la polaridad en las figuras de primera y segunda categoría* escrita en 1912, aunque no se publica hasta 1929, y *Fundamentos de Geometría Proyectiva Superior* (1916). En la primera "aparece ya de manifiesto la vastedad de conocimientos y la profundidad de Rey Pastor" (pág. [295]). La segunda es la obra más importante de Rey en España, y quizá de toda su vida; en ella no sólo mejora el sistema de axiomas de la geometría, sino que desarrolla sintéticamente la geometría compleja. "Los *Fundamentos* tuvieron muy buen éxito de crítica", nos dice el comentarista y lo documenta. Desgraciadamente su influencia futura no correspondió a su mérito, por razones que el mismo Rey pondrá de manifiesto, no sin cierta amargura, en su discurso de admisión a la Real Academia de Ciencias de Madrid (1920).

La tercera y última parte de *Selecta* está dedicada a los trabajos sobre historia y filosofía de la ciencia española. En la introducción, Ernesto García Camarero comenta primero los cuatro textos fundamentales que constituyen su selección, y luego *Cartografía mallorquina*, en cuya elaboración colaboró él mismo. El primer texto, que el comentarista cuida de situar en el ambiente adecuado de la polémica sobre la ciencia española, es el discurso inaugural del año académico 1913-14 de la Universidad de Oviedo con el título *Historia de la Matemática en España*, reeditado en 1925 con el título *Los matemáticos españoles del siglo XVI*. Este discurso ha dado merecida fama a su autor, por ser el primer matemático que con competencia y paciencia analiza el valor intrínseco de los matemáticos españoles del siglo XVI. Este discurso del que también me he ocupado yo, entre otros muchos, necesita ser matizado, lo cual lo hizo ya el mismo Rey Pastor en el discurso de homenaje a Menéndez Pelayo (1956). Los otros tres trabajos son tres discursos que pronunció Rey Pastor en la Real Academia de Ciencias de Madrid; el primero de éstos fue el discurso inaugural del curso 1932-33, con el título *Los progresos de España e Hispanoamérica en las Ciencias teóricas*. Los otros dos son discursos de contestación a Ricardo San Juan (1956) y a Sixto Ríos (1961) con motivo de la recepción de los mismos en la Academia. García Camarero a lo largo de su comentario va explicando la vocación de Rey Pastor de renovar las matemáticas en España y Argentina, creando por sí mismo, y mediante su magisterio a través de sus discípulos, un panorama moderno de las mismas.

Rey Pastor, que había escrito hacía ya tiempo su importante libro *La*

Ciencia y la Técnica en el Descubrimiento de América (1934, 1942, 1945), dirige, desde su creación en la Universidad de Madrid en 1955, el Seminario de Historia de la Ciencia. El tema central de estudio fue la historia de la cartografía náutica española. Fruto magnífico del Seminario fue la investigación sistemática de un repertorio de unas cuatrocientas cartas manuscritas, asignadas a la escuela de Mallorca y datadas entre 1300 y 1700. El resultado fue la publicación de *La cartografía mallorquina* (1960), escrita por Rey Pastor con "la invalorable colaboración" de su "brillante discípulo García Camarero".

De la lectura de *Selecta* surge un Rey Pastor que es, ante todo, un matemático verdadero, con una curiosidad insaciable y con una capacidad inagotable. El cual no se ha limitado a una única parcela, sino que ha sido geómetra, analista y algebrista; ni se ha polarizado exclusivamente en las matemáticas, sino que ha tenido una vasta cultura y ha cultivado con el mismo extraordinario éxito la historia de la ciencia y de la técnica españolas. El hecho de que los tres comentaristas sean discípulos de Rey Pastor, a quien además conocieron de cerca tanto en la vertiente académica como en el aspecto personal, confiere a *Selecta* un valor de testimonio, no despreciable aunque sea consistente con el que han expresado en otras ocasiones. (A. D.)

GENES AND EMBRYOS. Preparado por D. M. Glover y B. D. Hames. IRL Press at Oxford University Press. Oxford, 1989.

Genes and embryos aparece dentro de la serie "Frontiers in molecular Biology", que nos ofrece el estado actual del conocimiento en distintas áreas de la biología molecular. En este caso, el tema tratado es el del control genético de las primeras fases del desarrollo animal, en las que se establecen las líneas maestras de la arquitectura general del organismo. Para ello se han seleccionado cuatro organismos que se toman como modelos de sistemas de desarrollo: *Drosophila*, el nemátodo *Caenorhabditis*, el batracio *Xenopus* y el ratón; en ellos se centra actualmente gran parte de la investigación en genética del desarrollo. Divídese el libro en cinco capítulos.

La abundancia de conocimientos acumulados sobre la genética de *Drosophila*, así como la gran variabilidad de cepas de mutantes y con características que facilitan el análisis del desarrollo, han convertido, a este organismo, en el más adecuado para estudiar los procesos embrionarios. Por ello no debe extrañarnos que sea, también, el mejor conocido en ese aspecto. En *Drosophila* se han identificado más de 100 genes de la madre, del cigoto o de ambos, necesarios para las primeras fases del desarrollo.

Son dos los capítulos que se dedican al insecto. El primero, cuyo autor es K. V. Anderson, investiga el papel de los genes maternos que funcionan durante la ovogénesis, elaborando proteínas o ARN mensajeros, que se traducirán en proteínas, y se acumulan en el citoplasma ovular para actuar en las primeras fases del desarrollo del cigoto. El segundo, por M. S. Levine y K. W. Harding, se ocupa de la función de los genes del cigoto.

Durante décadas se ha supuesto la existencia de gradientes de substancias morfógenas activas en el desarrollo embrionario. Los estudios que actualmente se llevan a cabo en *Drosophila* han demostrado la existencia real de tales gradientes. En los dos capítulos indicados se examina la organización de los mismos en los ejes antero-posterior y dorso-ventral del cuerpo, cuya definición sólo parece requerir substancias sintetizadas por los genes de la madre. Se analiza el papel de las substancias morfógenas y de las que contribuyen a formar los gradientes de éstas, codificadas por genes maternos; no se olvida el autor del efecto local que ejercen las diferencias de concentración de las substancias morfógenas, activando o reprimiendo la transcripción de genes cigóticos específicos. En el segundo de los capítulos dedicados a la embriología de *Drosophila* se estudia, principalmente, el control genético de la segmentación y, en términos muy generales, de la diferenciación de las distintas regiones del cuerpo. Lo mismo que en los demás capítulos, sólo se describen los aspectos generales y tempranos de la formación del embrión, sin adentrarse en la organogénesis y diferenciación de tejidos.

El modelo de organización y, por tanto, de desarrollo de *Caenorhabditis* es mucho más sencillo que el de los otros tres organismos estudiados en el libro. Además, los linajes celulares originados en el desarrollo de este organismo son invariables, lo cual, unido a la relativa simplicidad del proceso, ha permitido describirlos por completo. La posibilidad de conseguir estos objetivos ha llevado a varios equipos de investigación a trabajar en la genética de este nemátodo, habiendo conseguido la identificación de numerosos genes de acción importante en el desarrollo. Gracias a esto ha sido posible estudiar con ventaja en *Caenorhabditis* los procesos de determinación de las células embrionarias. Así, el contenido del capítulo que se le dedica en el libro, debido a K. J. Kemphues, se centra principalmente en el aporte de la investigación en este organismo al conocimiento de los factores genéticos, moleculares y celulares que, en las primeras fases del desarrollo, determinan el destino de las células embrionarias.

Las características del ciclo biológico de los anfibios no son muy adecuadas para el análisis genético mendeliano, por cuyo motivo el conocimiento genético de estos animales no sólo no es comparable al de *Drosophila*, sino que también es muy inferior al de *Caenorhabditis*. A pesar de este inconveniente, la elección de *Xenopus* tiene aquí una razón muy clara. Los anfibios, y en particular las ranas, han sido el material de trabajo predilecto en los trabajos de embriología desde el siglo XIX. De estas investigaciones, llevadas a cabo con total independencia del crecimiento de la genética, surgieron las principales ideas clásicas sobre el desarrollo animal. Actualmente, la utilización de las técnicas de la genética molecular está permitiendo superar la dificultad de obtener conocimientos genéticos, interesantes para los estudios del desarrollo, en este grupo de vertebrados.

En el capítulo de T. D. Sargent, dedicado a *Xenopus*, se muestra que el modelo del desarrollo que surgió de los estudios clásicos sigue siendo válido. Con los resultados obtenidos con las técnicas de la genética molecular no sólo han sido confirmados, sino que, en algunos casos, se ha descubierto la base molecular de procesos que se habían descrito en términos generales. Así ha ocurrido con los fenómenos de inducción embrionaria, que se han corroborado, habiéndose, además, identificado algunas de las moléculas inductoras y los genes que las especifican. El estudio de los fenómenos de inducción es una de las partes más extensas e interesantes del capítulo. Además, como en los capítulos dedicados a *Drosophila*, se analiza también la organización, estructural y molecular, del citoplasma del huevo en relación con la arquitectura general del embrión y se abordan algunos de los progresos realizados en el conocimiento de la regulación genética en este organismo.

La embriología de los mamíferos, como en general toda la biología de este grupo, resulta de especial interés por su aplicación, más directa que la de otros organismos, al estudio del hombre. De ahí que, a pesar de las dificultades que ofrece la investigación del desarrollo de este grupo, debido a su carácter intrauterino, el

cuarto modelo de desarrollo elegido sea el de un mamífero, el ratón. Así, I. J. Jackson trata del desarrollo de este animal en el último capítulo del libro. Primero, presenta un esbozo general de su desarrollo, en las fases anteriores a la organogénesis. Describe después los genes que actúan en dichas fases y la acción de los productos moleculares especificados por estos genes, de una manera semejante a como se ha hecho en los capítulos anteriores, especialmente en los que se ocupan de *Drosophila* y *Xenopus*. A continuación analiza algunos genes mutantes, con efectos morfológicos, importantes para el estudio del desarrollo. Concretamente se refiere a genes con efectos en fases tempranas del desarrollo, entre otros, el de la *Oligosyndactilia* (Os), los del color del pelaje y el complejo *t*. Finalmente, explica con cierta extensión la utilización de los ratones transgénicos y de la ingeniería genética en general en el estudio del desarrollo del ratón.

Genes and Embryos es un libro útil para biólogos interesados en conocer el estado actual de la genética de las primeras fases del desarrollo embrionario, área cuyo conocimiento está evolucionando rápidamente. (A. P.)

RACE TO THE STRATOSPHERE. MANNED SCIENTIFIC BALLOONING IN AMERICA, por David H. DeVorkin. Springer-Verlag; Nueva York, 1989.

El interés por el estudio de la estratosfera siempre ha estado vivo. En ella se contiene la mayor parte del ozono existente en la atmósfera, gas de gran poder absorbente frente a las peligrosas radiaciones ultravioletas. A principios de siglo, las investigaciones sobre la estratosfera ofrecían, además, otro gran aliciente, pues se tenía la esperanza de esclarecer el origen de los rayos cósmicos; por entonces, dos premios Nobel americanos, Millikan y Compton, disputaban sobre la naturaleza de dichos rayos. El primero, a quien se debe la expresión "rayos cósmicos", mantenía la hipótesis de que estaban formados por fotones procedentes del espacio exterior y opinaba que constituían una fuerza reconstructora del universo; para Compton, los rayos cósmicos eran partículas elementales cargadas eléctricamente.

El libro de D. H. DeVorkin no es un estudio científico de la estratosfera, sino sólo un ameno relato histórico, con profusión de detalles, notas, bibliografía y documentación gráfica, sobre la larga serie de acontecimientos y visicitudes que rodearon a los aeronautas que perdieron su vida o la arriesgaron para explorar y estudiar esta región de la atmósfera, mediante una corta serie de ascensiones en globo efectuadas desde los EE.UU. durante la primera mitad de los años treinta.

La obra se articula, tras una breve introducción, en doce capítulos. Los seis primeros se refieren a otras tantas ascensiones estratosféricas, realizadas dos de ellas desde Europa y las cuatro restantes desde EE.UU. Los seis últimos capítulos recogen los esfuerzos llevados a cabo para intentar nuevas ascensiones, que nunca llegaron a realizarse; comentan, también, el legado tecnológico de esta aventura.

El primer capítulo trata de las ascensiones de Auguste Piccard (1931 y 1932). La realizada en 1931 fue la primera vez que el hombre alcanzaba esta capa de la atmósfera con éxito, es decir, logrando regresar sano y salvo. Aunque el libro se refiere fundamentalmente a las aventuras estratosféricas patrocinadas por los Estados Unidos, arranca con estas dos primeras ascensiones que fueron financiadas por la Fundación Nacional Belga para la Investigación Científica y realizadas desde Europa. El capítulo 2 cuenta la contratación de Auguste Piccard por los norteamericanos, en un intento de ponerse a la cabeza en la exploración estratosférica. En esta operación intervino de forma destacada Jean Piccard, hermano de Auguste y residente entonces en EE.UU.

En el capítulo 3 se relata la primera ascensión realizada desde EE.UU., que fue protagonizada por Settle y Fordney. Aconteció el 20 de noviembre de 1933. A esa ascensión le precedió, tres meses antes, un estrepitoso fracaso de Settle en solitario. En el capítulo 4 se cuenta la ascensión estratosférica realizada por Jean Piccard y su esposa Jeannette, en octubre de 1934. En este capítulo y en el anterior, el autor describe con detalle los preparativos del viaje y el instrumental científico transportado, así como los resultados más importantes de las investigaciones realizadas.

Los capítulos 5 y 6 están dedicados a las ascensiones de los globos *Explorer I* y *II*. El primero, en julio de 1934, iba tripulado por Anderson, Kepner y Stevens que, aunque salvaron sus vidas, hicieron parte del recorrido de regreso en paracaídas, ya que el globo en que viajaban se rompió y explotó; parte de su valioso instrumental científico pudo recuperarse. El *Explorer II*, el último de los grandes globos tripulados de los años treinta (Stevens y Anderson), batió el récord de altitud el 11 de noviembre de 1935.

En los capítulos 7 y 8 se repasan los desarrollos tecnológicos que tuvieron lugar después del *Explorer II*. El capítulo 9 habla de dos nuevos proyectos que nunca llegaron a convertirse en realidad: el *Pléyades II*, de Jean Piccard, consistente en la utilización conjunta de 100 globos con una única góndola de 2 toneladas y cuyo objetivo era alcanzar los 30 kilómetros de altitud; y el *Helio*, de carácter militar y que a pesar de emplear globos y aeronautas, ya tenía muy poco que ver con la investigación estratosférica. El capítulo 10 relata el nacimiento de la moderna tecnología de globos sonda a partir de lo conseguido hasta 1945. El capítulo 11 intenta demostrar, sólo con un éxito parcial, que aquel espíritu emprendedor constituye el fermento del programa Apolo, encaminado a la exploración de la Luna. Finalmente, el capítulo 12 contiene un resumen de las principales conclusiones.

Como es costumbre en este tipo de libros, la obra termina con una larga lista bibliográfica, en la que aparecen más de 300 títulos, así como con un índice muy completo de materias y autores. En resumen, se trata de una obra muy especializada, que posiblemente debido a ello aburra a los no conocedores de este episodio de la historia de la ciencia, pero que ganará el interés de los entusiastas de la aventura humana hacia la estratosfera.

A lo largo de esta abigarrada historia se observa un paralelismo con la más reciente de los viajes espaciales tripulados. La exploración de la estratosfera estuvo rodeada de muchas de las mismas circunstancias que han existido y existen todavía en la aventura espacial. Se trata, pues, de una historia heroica, en la que no faltan la pugna entre los partidarios de la presencia del hombre en el espacio y los partidarios de conceder mayor protagonismo a las máquinas, entre los proyectos militares y los civiles, en la que unos pretendía logros humanos y otros buscaban resultados científicos, en la que algunos creían en el imprescindible papel de los "exhibicionistas" y otros eran enemigos de esta abundante y peligrosa especie.

Es una pena que, en un trabajo como éste, no se haya incluido uno o dos capítulos más dedicados a las ascensiones a la estratosfera realizadas desde la Unión Soviética, lo que hubiera completado admirablemente el panorama de esta instructiva recopilación histórica. (L. R.)

STUDIES IN MEDIEVAL NATURAL PHILOSPHY. Dirigido por Stefano Caroti. Leo S. Olschki; Florencia, 1989. **THOMAS BRADWARDINE, GEOMETRIA SPECULATIVA.** Edición preparada por

George Molland. Franz Steiner Verlag Wiesbaden GmbH; Stuttgart, 1989.

La filosofía natural bajomedieval se ha convertido en campo de Agramante. ¿Quién lo diría? De una manera sutil, por supuesto. No vale ya la crítica global, tan grosera cuan indocumentada, que rechazaba todo lo pregalileano como escolástico de mal latín y vacío de concepto. Algo está pasando cuando el propio I. Bernard Cohen se ha visto obligado a afirmar la independencia galileana de todo pensamiento anterior, fundando esa aseveración de escasa consistencia en que los medievales trataban de abstracciones y no del mundo real.

Empecemos la historia por el comienzo. Desde las postrimerías del siglo XIII, y a lo largo de toda la centuria siguiente, atraviesa Europa, el continente y las Islas Británicas, una poderosa corriente logicista y matemática, aunque su influjo se deja sentir en todas las ramas del saber (desde la física hasta la teología). Tradicionalmente se ha venido insistiendo en la figura de Guillermo de Ockham; hoy sobresalen otros autores, singularizados (Juan Buridan, Alberto de Sajonia, Nicolás de Oresme) o por escuelas (los calculistas de Oxford). Ahora bien, considerados, por unos, filósofos menores y, escolásticos a la postre, por otros, quedaron antaño arrumbados en brevísimos apéndices de los manuales. Para los segundos la ciencia empezaba en Galileo y en su ruptura con todo lo anterior.

A principios de nuestro siglo, un físico francés, Pierre Duhem, remueve las aguas con unos sólidos estudios sobre la física medieval y su carácter "moderno". (Digamos a modo de inciso que, tras una breve etapa reciente de descalificación de Duhem por razones ideológicas en algunos círculos, vuelve a mirársele, incluso en éstos, con respeto precisamente de la mano de Edith Sylla, autoridad para Cohen en ciencia pregalileana. No le extrañe, empero, al lector encontrar en libros españoles de los últimos años invectivas contra el físico e historiador francés. Aquí, salvo en el dicterio, vamos retrasados.)

Tras Duhem, Anneliese Maier con un primer título que no dejaba sitio a la ambigüedad: *Die Vorläufer Galileis im 14. Jahrhundert. Studien zur Naturphilosophie der Spätscholastik.* ("Los precursores de Galileo en el siglo XIV. Estudios sobre filosofía natural de la tardoescolástica".) Sumadas a otras obras posteriores y a las de Marshall Clagett sobre medidas y mecánica medievales o sobre Arquímedes, Nicolás de Oresme, Francisco de Ferrara, etcétera, quedaba claro que lo del imaginado o deseado desierto científico antes de Galileo era pura invención.

La historiografía, asentada sobre esos pilares, ha ido profundizando en los temas y en los autores. Un resumen de la cuestión nos lo ofrece la primera monografía de la biblioteca *Nuncius* (revista italiana de historia de la ciencia): *Studies in Medieval Natural Philosophy*, donde se recogen colaboraciones de distinto alcance. John Z. Murdoch introduce la cuestión exponiendo las implicaciones de la lógica en la filosofía natural bajomedieval. Si el siglo XIII ahondaba en el contenido, el XIV preferirá anteponer el rigor lógico a lo expresado. Un fenómeno que se repite en la historia. (Si se nos permite una analogía contemporánea, la filosofía analítica ha puesto una brida a especulaciones sin base; mas, también a imagen de la filosofía del siglo XIV, se ha entregado en problemas éticos a un voluntarismo o transaccionismo irracional.) La lógica que se desarrolla es una suerte de lógica proposicional y modal, donde los términos remiten a entidades reales particulares: *supponunt pro*. Se le exige al alumno, sobre todo, la resolución de los sofismas o contradicciones que puedan develarse mediante las reglas de derivación. Francesco Bottin (*"Pertransire spatium: le origini filosofiche di un sofisma sullo spazio"*) y Alain de Sibera ("Le problématique de 'l'instant de changement' au XIII siècle: Contribution à l'histoire des *sophismata physicalia*") aplican esa estructura de razonamiento a sendas cuestiones físicas y matemáticas.

Más ceñidas a un autor y un tema (la certeza en Ockham, la necesidad en Buridan, la potencia absoluta de Dios en Buridan y Oresme, o la doctrina sobre el límite en varios escritores) se mueven las colaboraciones de Godder, Hugonnard-Roche, Knuuttila y Caroti. De la prolongación de los calculistas, en Alvarus Thomas, se ocupa Sylla, quien agrega un fragmento sobre el movimiento uniformemente acelerado.

En veinte páginas resume Edward Grandt las infidelidades aristotélicas de los medievales –y, por tanto, su "modernidad". Primera, en cosmología, con la aceptación de las excéntricas y los epiciclos; segunda, en lo relativo a la quintaesencia, la negación de tal; tercera, al admitir el vacío extracósmico; cuarta, en la creación de experimentos ideales; quinta, en la matematización de los fenómenos reales, es decir, la introducción de la matemática en la física, y, sexta, en el reconocimiento de cierto movimiento de la Tierra.

Exponente adelantado de la matematización de la física –el gran logro galileano– fue Thomas Bradwardine, quien axiomatiza, *more Euclideo*, la geometría. A él vuelve George Molland con esta impresión de su tesis doctoral, puesta al día: *Thomas Bradwardine, Geometria speculativa*. Molland colabora en el libro primero de reseña con un artículo sobre la física matemática medieval y el holismo aristotélico, es decir, sobre las relaciones de contigüidad y continuidad en el mundo físico y en el matemático.

Bradwardine (*circa* 1295-1349) aglutina el núcleo de lo que en historia de la ciencia se llaman los mertonianos o "calculatores oxonienses", cuyas ideas podemos enunciar sumariamente a través de los títulos de las obras de aquél: lógica aplicada al desarrollo de un proceso físico en función del tiempo (así, en *De incipit et desinit*, "sobre el comienzo y el fin"); cambio de velocidad en un móvil sometido a distintas fuerzas de aceleración y resistencia (*Tratado de las razones de las velocidades en los movimientos*); composición de los entes continuos y su oposición a un atomismo ilimitado (*Tratado sobre el continuo*). El referente algébrico y geométrico que da respaldo a lo anterior nos lo ofrece, sobre todo, en su *Geometría speculativa*, cuya edición crítica y traducción, más una introducción y un comentario, aporta aquí.

Geometría speculativa era un texto auxiliar para el alumno, obligado a estudiar Euclides o Boecio. Consta de cuatro partes. La primera se ocupa de las definiciones (noción de punto, recta), postulados (v.g. igualdad de ángulos rectos) y axiomas fundamentales (conversión del todo con sus partes), y dedica sendos capítulos a las líneas y los polígonos. En la segunda parte son objeto de estudio los triángulos, los círculos y las figuras isoperimétricas. Con las razones y proporciones comienza la tercera parte, que aborda también simetrías y áreas. La última parte expone la geometría del continuo, composición de figuras en el espacio y la esfera.

La suerte de *Geometría speculativa* va unida a un español: Pedro Sánchez Ciruelo (con *u*, no con *v*, que transcribe Molland). Este aragonés de Daroca enseñaba matemática en París en la última década del siglo XV para subvenir a sus estudios teológicos. Allí editó, en 1494, la *Arithmetica speculativa*, atribuida a Bradwardine, y la *Geometria speculativa*, trabajo que ha servido de punto de partida para éste de Molland, quien ha cotejado los manuscritos preexistentes y ha confirmado el valor del empeño del hispano. (L. A.)

Apuntes

Los hitos de la investigación se cuentan por innovaciones o por acoplamientos de técnicas preexistentes. A estos últimos pertenece la combinación de un acelerador, un sincrotrón y un anillo de almacenamiento de iones pesados, inaugurado recientemente en Darmstadt. Se espera mucho del nuevo ingenio; por ejemplo, la creación de más de medio millar de isótopos de corta vida de elementos conocidos, aceleración de iones pesados (el uranio) a unos 1,3 gigaelectronvolt de energía, sondeo de la estructura de las capas internas de electrones y repetición de las colisiones que ocurren en el seno de las estrellas.

Hace cinco años A. J. Jeffreys venía en auxilio de la justicia con el descubrimiento de las huellas dactilares de ADN. No se le ha sacado aún todo el partido a esa técnica, y Jeffreys acaba de refinarla de manera espectacular: ''cómo hallar huellas dactilares de ADN dentro de esas huellas''. Esa es la aplicación forense, porque a su inventor lo que realmente le interesa es la cartografía de la variación secuencial de grano fino en un locus de ADN minisatélite, expresión críptica que alude a las distribuciones de los mutantes en las moléculas de un locus minisatélite. Y siguiendo con voluntad de aclarar, por locus minisatélite se entiende la secuencia repetida de ADN, de cabeza a cola, cuyas diferencias alélicas nacen de las fluctuaciones en el número de repeticiones.

Para explicar el comportamiento de un fluido estratificado en un lecho irregular, viejo problema éste de hidrodinámica, se ha venido confiando en los registros acústicos, gracias a los cuales se conocen mejor los mecanismos de generación de ondas internas. Pero las observaciones se limitaban a distintos accidentes topográficos. Nunca hasta ahora se había acometido el estudio de cómo una secuencia cuasiperiódica de dorsales del suelo condiciona el flujo estratificado. Estudio que ha sacado a luz la presencia de ondas internas resonantes, cuyo examen ayudará a entender mucho mejor la compleja física de los estuarios.

Dice el axioma: en tectónica de placas, las rígidas que presentan deformación se concentran en los límites de placa. Reza la excepción: salvo la deformación intraplaca que se observa en la cuenca del océano Indico central. Justifica el sismólogo: las fallas inversas que los perfiles de reflexión sísmica denuncian en los sedimentos de esa zona y se extienden a través de la corteza y posiblemente llegan al manto superior son resultado de la reactivación de fallas preexistentes.

De las excepciones a las paradojas. Sabíase la ruta migratoria de la ballena gris de California y su estancia en el Artico. Afirmábase el caracter desértico, a efectos productivos, de las regiones polares. ¿De qué se alimentaban los cetáceos? A lo largo de los últimos años se han ido descubriendo el rendimiento de la columna de agua y el desarrollo de comunidades bentónicas. Matizando más, se ha demostrado que la especie dominante con mucho es la de un crustáceo anfípodo (*Ampelisca macrocephala*), un buen bocado para la ballena gris.

Según parece cada vez más claro, gusto y olfato guardan una profunda semejanza molecular. Ambos sentidos están mediados por proteínas que residen en las superficies apicales de sus respectivas células receptoras. El aislamiento y caracterización de las proteínas relacionadas con los olores, segregadas por glándulas nasales de ratones, vacas y ranas, conducen a la hipótesis de que tales proteínas actuarían como cofactores de la olfación, al concentrar y ceder los odorantes a los receptores. De forma pareja ocurriría en el sentido del gusto, cuyo mecanismo de operación necesitaría también de procesos pre-receptores para la concentración y cesión de moléculas sápidas al sistema gustativo.

Los gabinetes de historia natural del XVIII disputaban por la propiedad de piedras cada vez más exóticas. Vinieron luego los sistemas de clasificación de las mismas atendiendo a sus propiedades químicas y cristalográficas. A los minerólogos les preocupa hoy el modo de formación de las mismas que les dé la clave de los procesos tectónicos de la corteza. Por dar un ejemplo, se descubrió hace tiempo que el diamante se presentaba en kimberlitas, lamproítas y sedimentos aluviales que derivaban de esas rocas; en 1986 se le halló en picritas; en 1989, en macizos ultramáficos. Dos geólogos soviéticos acaban de encontrar inclusiones de diamante en granates procedentes de rocas metamórficas.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



EL GRAN DEBATE SOBRE EL CLIMA, por Robert M. White
El efecto de invernadero y la posibilidad de un calentamiento global son objeto de discusión científica y política. ¿Debemos tomar medidas ahora para evitar consecuencias que no podemos prever?

EL CHANCRO DEL CASTAÑO, por Joseph R. Newhouse
Se le ha declarado la guerra al hongo que arrasa las plantaciones de castaños. El arma: otro parásito.

EL COLISIONADOR LEP, por Stephen Myers y Emilio Picasso
El Gran Colisionador Electrón-Positrón producirá un millón de partículas Z° este año. La abundancia de datos permitirá a los físicos poner a prueba sus teorías.

¿QUE CAUSA LA DIABETES?, por Mark A. Atkinson y Noel K. MacLaren
En el caso de la diabetes mellitus dependiente de insulina, la contestación está en la respuesta autoinmune de las propias células productoras de la hormona. Comienza a saberse la razón de ese ataque.

LA GRAN MANCHA ROJA DE JUPITER, por Agustín Sánchez Lavega
Longevo e inmenso vórtice de nubes en rotación anticiclónica, mide unas dos veces el diámetro de la Tierra. Su naturaleza y persistencia en la turbulenta atmósfera de Júpiter siguen representando un desafío.

PIROTECNIA, por John A. Conkling
Se están estudiando los secretos que se esconden tras los deslumbrantes fuegos artificiales. Unos principios similares a los que rigen la pirotecnia se utilizan en dispositivos tan diferentes como las cerillas corrientes y las lanzaderas espaciales.

GENES Y PLAN CORPORAL DE LOS VERTEBRADOS, por Eddy M. De Robertis, Guillermo Oliver y Christopher V. E. Wright
Los genes "homeobox" determinan la morfología del cuerpo. Segmentan al embrión, a lo largo de un eje, en campos de células que se convertirán en extremidades y otras estructuras.

TEORIA DE RAMSEY, por Ronald L. Graham y Joel H. Spencer
Frank Plumpton Ramsey, un brillante matemático, demostró la imposibilidad del desorden completo. Toda colección grande de números, puntos u objetos contiene por necesidad configuraciones sumamente regulares.

